



HAL
open science

Continuité de l'expérience d'apprentissage et transposition didactique des savoirs dans l'enseignement de la physique : comparaison internationale dans le cas des propriétés de la matière

Laurence Marty

► To cite this version:

Laurence Marty. Continuité de l'expérience d'apprentissage et transposition didactique des savoirs dans l'enseignement de la physique : comparaison internationale dans le cas des propriétés de la matière. Education. Université Toulouse le Mirail - Toulouse II; Université de Genève (Genève, Suisse), 2019. Français. ⟨NNT : 2019TOU20018⟩. ⟨tel-02928977⟩

HAL Id: tel-02928977

<https://theses.hal.science/tel-02928977v1>

Submitted on 3 Sep 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par l'Université Toulouse – Jean Jaurès

Cotutelle internationale : Université de Genève

Présentée et soutenue par

Laurence MARTY

Le 16 avril 2019

Continuité de l'expérience d'apprentissage et transposition didactique des savoirs dans l'enseignement de la physique

Comparaison internationale dans le cas des propriétés
de la matière

ED CLESCO : **Sciences de l'éducation**

Unité de recherche : UMR Education Formation Travail Savoirs (EFTS)

Directeur(s)/trice(s) de Thèse

Patrice VENTURINI, Professeur émérite, Université Toulouse-Jean Jaurès

Florence LIGOZAT, Professeur associée, Université de Genève

Jury

Cécile DE HOSSON, rapporteure, Professeure des universités, Université Paris
Diderot

Franca LEUTENEGGER, examinatrice, Professeure retraitée, Université de
Genève

Andreas MÜLLER, examinateur, Professeur ordinaire, Université de Genève

Valérie MUNIER, rapporteure, Professeure des universités, Université de
Montpellier

Bernard SCHNEUWLY, examinateur, Professeur honoraire, Université de Genève

Sous la co-direction de
Florence Ligozat et Patrice Venturini

Continuité de l'expérience d'apprentissage et transposition didactique des savoirs dans l'enseignement de la physique

Comparaison internationale dans le cas des propriétés de la matière

THÈSE EN CO-TUTELLE

Présentée

pour obtenir le grade de Docteur en **Sciences de l'Education**

à la **Faculté de psychologie et des sciences de l'éducation de l'Université de Genève**

et

à l'**Université Toulouse – Jean Jaurès**

par

Laurence MARTY

Membres du jury :

Cécile DE HOSSON, rapporteure, Professeure des universités, Laboratoire de didactique André Revuz,
Université Paris Diderot

Franca LEUTENEGGER, examinatrice, Professeure retraitée, Faculté de psychologie et des sciences de
l'éducation, Université de Genève

Florence LIGOZAT, co-directrice, Professeure **associée, Faculté de psychologie et des sciences de l'éducation,**
Université de Genève

Andreas MÜLLER, examinateur, Professeur ordinaire, Faculté des sciences, Section de Physique, Université de
Genève

Valérie MUNIER, rapporteure, Professeure des universités, Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche en
Didactique, Éducation et Formation, Université de Montpellier

Bernard SCHNEUWLY, examinateur, Professeur honoraire, Faculté de psychologie et des sciences de
l'éducation, Université de Genève

Patrice VENTURINI, co-directeur, Professeur des Universités émérite, UMR Éducation Formation Travail Savoirs
(EFTS), Université de Toulouse – Jean Jaurès

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont en tout premier lieu à ma directrice de thèse Florence Ligozat et mon directeur Patrice Venturini. J'ai eu la chance de bénéficier, à vos côtés, d'un encadrement à la fois exigeant et bienveillant, rigoureux sur le plan scientifique et ouvert à mes suggestions. Merci de n'avoir pas compté les heures passées à me former, pour les opportunités de rencontre scientifique, pour l'initiation au monde de la recherche. Me voilà transformée par l'expérience mais c'était le but, n'est-ce-pas ?

Merci à Francia Leutenegger qui m'a accompagnée toutes ces années, depuis l'accueil chaleureux dans l'équipe de didactique comparée jusqu'à la relecture attentive du manuscrit avec un regard "neuf" en fin de parcours.

Je remercie également Cécile de Hosson, Andreas Müller, Valérie Munier et Bernard Schneuwly qui ont accepté de me faire l'honneur de leur présence dans mon jury et de se plier aux règles du jeu un peu fastidieuses d'une co-tutelle.

Merci à Laura Weiss pour son introduction au système scolaire suisse-romand et à ses subtilités et pour son aide précieuse à la recherche d'enseignants volontaires.

Evidemment, ce travail doit tout aux enseignant(e)s qui m'ont accueillie dans leur classe : ma gratitude extrême va à Amélie, Louise, Esther et Nathan qui ont accepté de se laisser filmer « à l'aveuglette » sans connaître le traitement réservé aux vidéos captées. Je remercie également les enseignants qui ont participé à la recherche, mais qui, pour une raison ou une autre, n'apparaissent pas dans le manuscrit.

Merci à Ignacio Monge et aux collègues du séminaire romand de didactique comparée pour les échanges stimulants et l'ouverture sur des recherches didactiques relatives à d'autres disciplines.

Merci aux collègues de l'UMR EFTS de Toulouse avec qui j'ai souvent pu faire le point sur la thèse et qui m'ont toujours fourni des retours qui m'ont aidée à avancer.

Merci aux collègues de l'équipe de didactique des sciences de Genève pour m'avoir acceptée dans leur séminaire. Merci à Marine et Florian pour les pauses repas/thé/goûter toujours bienvenues. Marine, ta correction "de dernière minute" a été très appréciée.

Merci aux collègues de l'Université d'Uppsala et de l'Université de Stockholm, en particulier Jonas Almqvist, Karim Hamza et Eva Lundqvist pour la découverte d'autres formes d'investigation des pratiques d'enseignement et d'apprentissage scientifiques et pour les collaborations enrichissantes qui ont pu se développer ces dernières années.

Enfin, mes pensées vont à tous ceux, qui de façon volontaire ou non, m'ont "portée" au cours de ces années de recherche : ma famille et mes amis.

Merci à ma famille et mes amies "du Sud" qui sont volontaires pour "braver le froid" et assister à ma soutenance.

Merci à ma mère, mon père et mon frère, pour l'écoute attentive, les corrections orthographiques, les distractions, l'épaule solide en cas de déménagement/cambriolage/pépins de vie/etc., le sens du devoir, la confiance. Merci pour votre soutien toujours renouvelé, pas toujours mérité.

Mickaël, survivre à deux thèses consécutives (presque 10 ans de thèse, quand même !) me semble relever de l'exploit. Merci d'avoir pris l'avion comme on prend le bus, pour ta prévenance quotidienne et ton sens solide des priorités. Le meilleur est à venir.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	5
CHAPITRE 1 ANALYSE DIDACTIQUE DES PRATIQUES D'ENSEIGNEMENT ET D'APPRENTISSAGE	9
1.1 L'ANALYSE DES PRATIQUES D'ENSEIGNEMENT ET D'APPRENTISSAGE EN DIDACTIQUE : CONCEPTS FONDATEURS	9
1.2 LE COMPARATISME EN DIDACTIQUE	20
1.3 L'ETUDE DE L'ACTION CONJOINTE DE L'ENSEIGNANT ET DES ELEVES EN DIDACTIQUE	24
1.4 L'ANALYSE A PRIORI	36
1.5 LES NIVEAUX DE DETERMINATION DE L'ACTION PROFESSORALE	37
1.6 CONCLUSION	40
CHAPITRE 2 ÉTUDE DES SAVOIRS EPISTEMOLOGIQUES ET DIDACTIQUES RELATIFS A L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES PHYSIQUES A L'ARTICULATION PRIMAIRE-SECONDAIRE	41
2.1 LES SAVOIRS SCIENTIFIQUES ET LEUR TRANSPOSITION	41
2.2 QUELQUES SAVOIRS EPISTEMOLOGIQUES ET DIDACTIQUES RELATIFS A L'ENSEIGNEMENT DES PROPRIETES DE LA MATIERE	64
2.3 POSITIONNEMENT ET CONCLUSION	77
CHAPITRE 3 ÉTUDE DES CONTEXTES INSTITUTIONNELS DE L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES PHYSIQUES EN FRANCE ET EN SUISSE ROMANDE A L'ARTICULATION PRIMAIRE-SECONDAIRE	83
3.1 L'ENSEIGNEMENT DES SAVOIRS LIES AUX PHENOMENES PHYSIQUES AU PRIMAIRE ET AU SECONDAIRE EN FRANCE	83
3.2 L'ENSEIGNEMENT DES SAVOIRS LIES AUX PHENOMENES PHYSIQUES AU PRIMAIRE ET AU SECONDAIRE EN SUISSE ROMANDE	97
3.3 COMPARAISON INTERINSTITUTIONNELLE DE L'ENSEIGNEMENT DES SAVOIRS LIES AUX PHENOMENES PHYSIQUES EN FRANCE ET EN SUISSE ROMANDE	105
3.4 CONCLUSION	108
CHAPITRE 4 PROBLEMATIQUE ET QUESTIONS DE RECHERCHE	111
CHAPITRE 5 DEMARCHE METHODOLOGIQUE	115
5.1 LE CHOIX DE LA THEMATIQUE : LES PROPRIETES DE LA MATIERE	115
5.2 POSITIONNEMENT DE LA DEMARCHE METHODOLOGIQUE	116
5.3 LE RECUEIL DES DONNEES ET LA CONSTRUCTION DE TRACES PRIMAIRES	118
5.4 LE TRAITEMENT DES DONNEES ET LA CONSTRUCTION DE TRACES SECONDAIRES	122
5.5 CONCLUSION	132
CHAPITRE 6 ANALYSE DES SAVOIRS EN JEU ET DES OBSTACLES EPISTEMOLOGIQUES COMMUNS A TOUTES LES OBSERVATIONS	135

6.1	LES MODELES SCIENTIFIQUES LIES A LA VAPEUR D'EAU, L'EAU LIQUIDE, L'EVAPORATION, LA CONDENSATION ET L'EBULLITION	135
6.2	LES OBSTACLES EPISTEMOLOGIQUES RELATIFS A LA VAPEUR D'EAU, L'EAU LIQUIDE, L'EVAPORATION, LA CONDENSATION ET L'EBULLITION	141
<u>CHAPITRE 7 ANALYSE EMPIRIQUE D'UNE CLASSE AU PRIMAIRE EN SUISSE ROMANDE : AMELIE</u>		<u>147</u>
7.1	PRESENTATION DU CONTEXTE DE LA CLASSE D'AMELIE	148
7.2	PRESENTATION GENERALE DES SEANCES OBSERVEES	148
7.3	PRESENTATION DES ENJEUX ETUDIES : N1, N4 ET N5	151
7.4	ANALYSE MICROSCOPIQUE DE CINQ PHASES : N13C, N41C ET N43A, N45A, N51C	160
7.5	SYNTHESE DE L'ANALYSE DES DIFFERENTS EXTRAITS : DYNAMIQUE DE CONSTRUCTION DES SAVOIRS ET SCHEMAS D'ACTION	184
<u>CHAPITRE 8 ANALYSE EMPIRIQUE D'UNE CLASSE AU PRIMAIRE EN FRANCE : LOUISE</u>		<u>191</u>
8.1	PRESENTATION DU CONTEXTE DE LA CLASSE DE LOUISE	191
8.2	PRESENTATION GENERALE DES SEANCES OBSERVEES	192
8.3	PRESENTATION DE L'ENJEU N2 ETUDIE : ÉTUDE DES PROPRIETES DE LA VAPEUR D'EAU, DE L'EAU LIQUIDE, DE L'EVAPORATION ET DE LA CONDENSATION	193
8.4	ANALYSE MICROSCOPIQUE DES TROIS PHASES : N22C, N22G ET N24A	198
8.5	SYNTHESE DE L'ANALYSE DES DIFFERENTS EXTRAITS : DYNAMIQUE DE CONSTRUCTION DES SAVOIRS ET SCHEMAS D'ACTION	219
<u>CHAPITRE 9 ANALYSE EMPIRIQUE D'UNE CLASSE AU SECONDAIRE INFERIEUR EN SUISSE ROMANDE : ESTHER</u>		<u>227</u>
9.1	PRESENTATION DU CONTEXTE DE LA CLASSE D'ESTHER	228
9.2	PRESENTATION GENERALE DES SEANCES OBSERVEES	228
9.3	PRESENTATION DE L'ENJEU N2 ETUDIE : ÉTUDE DU PHENOMENE D'EVAPORATION AUX ECHELLES MACROSCOPIQUE ET MICROSCOPIQUE	230
9.4	ANALYSE MICROSCOPIQUE DES TROIS PHASES : N21F, N22B ET N22C	236
9.5	SYNTHESE DE L'ANALYSE DES DIFFERENTS EXTRAITS : DYNAMIQUE DE CONSTRUCTION DES SAVOIRS ET SCHEMAS D'ACTION	258
<u>CHAPITRE 10 ANALYSE EMPIRIQUE D'UNE CLASSE AU SECONDAIRE INFERIEUR EN FRANCE : NATHAN</u>		<u>265</u>
10.1	PRESENTATION DU CONTEXTE DE LA CLASSE DE NATHAN	265
10.2	PRESENTATION GENERALE DES SEANCES OBSERVEES	265
10.3	PRESENTATION DE L'ENJEU N6 ETUDIE : ETUDE DES PROPRIETES DE L'EBULLITION DES CORPS PURS	268
10.4	ANALYSE MICROSCOPIQUE DES QUATRE PHASES : N61C, N61B & N61D, ET N61E	272
10.5	SYNTHESE DE L'ANALYSE DES DIFFERENTS EXTRAITS : DYNAMIQUE DE CONSTRUCTION DES SAVOIRS ET SCHEMAS D'ACTION	303
<u>CHAPITRE 11 DISCUSSION DES RESULTATS</u>		<u>311</u>

11.1	LES FORMES D'ÉPISTEMOLOGIE PRATIQUE DANS LES CLASSES OBSERVÉES	311
11.2	CONDITIONS GÉNÉRIQUES DE L'ÉTABLISSEMENT D'UNE CONTINUITÉ ENTRE RAPPORTS AUX OBJETS CONSTRUITS PAR LES ÉLÈVES ET RAPPORTS AUX OBJETS VISÉS PAR L'ENSEIGNANT	339
11.3	RETOUR SUR LE POSTULAT D'UNE ANALOGIE ENTRE APPRENTISSAGE DES SAVOIRS SCIENTIFIQUES À L'ÉCOLE ET PRODUCTION DES SAVOIRS AU SEIN DES COMMUNAUTÉS SCIENTIFIQUES	350
	CONCLUSION	355
	BIBLIOGRAPHIE	359
	TABLE DES TABLEAUX	377
	TABLE DES ILLUSTRATIONS	379
	TABLE DES MATIÈRES	381
	ANNEXES (NON DIFFUSÉES)	388

INTRODUCTION

Dans les pays francophones, depuis quelques décennies, l'enseignement des sciences à l'école obligatoire a subi plusieurs rénovations majeures, sous l'impulsion d'une multiplicité d'influences (importation de la méthode « Hands-On » par Georges Charpak en 1996, Plan de Rénovation de l'Enseignement des Sciences et de la Technologie à l'Ecole en 2000, rapport Rocard en 2007, rapport Eurydice en 2006, etc.). De nouveaux termes ont progressivement gagné de l'importance dans les textes prescriptifs : « démarche scientifique », « démarche d'investigation », « démarche expérimentale », « compétences », etc. Il s'agit pour l'enseignant d'engager l'élève dans une posture active de découverte et d'exploration du monde qui l'entoure, attestée par une approche de questionnement, de résolution de problèmes, d'investigation. Les moyens préconisés pour favoriser cette posture s'inspirent de certains des modes d'élaboration des savoirs par les scientifiques. Cette approche repose plus ou moins explicitement sur l'idée que les savoirs scientifiques peuvent s'apprendre à l'école selon des procédures analogues avec celles de la production des savoirs au sein des communautés scientifiques. Elle s'affiche parfois dans le discours des chercheurs, des formateurs et des enseignants avec une telle évidence qu'il est facile d'oublier qu'il s'agit d'un choix résultant d'un processus de transposition. En particulier, un mode de reconstruction des savoirs a connu un succès fulgurant dans les textes prescriptifs des années 2000 : de forme hypothético-déductive, il se déroule en plusieurs étapes qui se nouent autour de la formulation et du test d'hypothèses.

Pourtant, un certain nombre de critiques ont été formulées depuis les sciences psychologiques, épistémologiques ou didactiques, à propos de cette approche analogique entre apprentissage des savoirs scientifiques à l'école et production des savoirs au sein des communautés scientifiques. Par exemple, les travaux menés en psychologie cognitive par Kirschner, Sweller & Clark (2006) leur permettent de proclamer une « incompatibilité entre un enseignement dirigé minimalement par l'enseignant et notre connaissance de l'architecture cognitive humaine¹ » (p. 78). Ils ajoutent que :

Yet it may be a fundamental error to assume that the pedagogic content of the learning experience is identical to the methods and processes (i.e., the epistemology) of the discipline being studied (...) the way an expert works in his or her domain (epistemology) is not equivalent to the way one learns in that area (pedagogy). (p. 78)

Au niveau épistémologique, les chercheurs montrent que les méthodes de construction des savoirs scientifiques sont multiples (Bernard, 1865 ; Duhem, 1906 ; Kuhn, 1962/1983 ; Lakatos, 1994 ; Feyerabend, 1979 ; Bachelard, 2000) : une méthode canonique n'est pas en mesure de s'appliquer à toutes les disciplines scientifiques, voire même à toutes les problématiques au sein

¹ Notre traduction de : « incompatibility of minimally guided instruction with our knowledge of human cognitive architecture »

d'une discipline donnée. Une pluralité de schémas d'action semble donc être à l'œuvre derrière les modes de développement des savoirs scientifiques.

Au regard de cette variété, l'hégémonie d'une démarche de nature hypothético-déductive dans l'enseignement des sciences interroge, dans la mesure où cette démarche est loin de refléter la complexité de la construction des savoirs scientifiques au sein des communautés de référence. Elle interroge d'autant plus, que selon certains textes prescriptifs (en France, notamment), « la » démarche d'investigation de nature hypothético-déductive est censée s'appliquer à toutes les disciplines scientifiques (physique-chimie, sciences de la vie et de la terre, technologie) même si leurs enjeux et les objets qu'elles convoquent sont drastiquement différents. D'autre part, on peut questionner le fait qu'une unique démarche puisse être convoquée de la même manière du début de l'école primaire à la fin du secondaire alors même que l'état des connaissances des élèves évolue au gré de leurs possibilités cognitives d'exploration du monde et au fil de l'enseignement scientifique qu'ils reçoivent. Enfin, le projet de construire les programmes d'enseignement dans un certain rapport de ressemblance avec les épistémologies des pratiques scientifiques se heurte rapidement à l'écart fondamental qui existe entre élève et chercheur : un élève, par définition, entre dans une culture disciplinaire dont il ignore tout tandis que le chercheur possède déjà les ressources adéquates pour mener à bien ses propres recherches. Comme le soulignent Kirschner, Sweller & Clark (2006), dans une critique de l'approche analogique :

The major fallacy of this rationale is that it makes no distinction between the behaviors and methods of a researcher who is an expert practicing a profession and those students who are new to the discipline and who are, thus, essentially novices (p. 79).

Pour dépasser un débat binaire - est-il possible, oui ou non, pour les élèves d'apprendre les sciences à la manière dont les scientifiques les construisent ? -, nous estimons qu'il est fructueux d'explorer ces questionnements sous l'angle transpositif. Autrement dit, il s'agit d'investiguer la nature analogique du rapport entre apprentissage des savoirs scientifiques à l'école et production des savoirs au sein des communautés scientifiques : que transpose-t-on des pratiques scientifiques de référence ? Quels aspects de ces pratiques sont retenus/exclus ? Sur quels critères se fondent les choix des aspects retenus des pratiques scientifiques de référence à des fins de transposition dans les classes ? Comment les aspects retenus sont-ils aménagés et transformés pour satisfaire aux contraintes de la classe ? Quels sont les effets des modalités particulières de transposition sur la dynamique de construction des savoirs ?

Dans ce travail, nous considérons que ces problématiques peuvent être investiguées de manière ascendante en analysant la dynamique effective de co-construction des savoirs dans des pratiques de classes ordinaires, d'une part et selon une perspective comparatiste en choisissant des contextes contrastés en termes de modalités de transposition, d'autre part.

Le champ des recherches en didactique comparée, dans lequel nous inscrivons cette thèse, poursuit une visée fondamentale de caractérisation des pratiques d'enseignement et d'apprentissage et des logiques d'action de l'enseignant et des élèves. Nous argumenterons que

ce travail bénéficie de l'apport de la modélisation de l'action didactique comme action conjointe, d'une part (Sensevy, Mercier et Schubauer-Leoni, 2000; Sensevy & Mercier, 2007, Ligozat & Leutenegger, en préparation) et d'une approche pragmatiste de l'analyse de l'évolution des rapports aux objets construits par l'enseignant et les élèves, d'autre part (Chevallard, 2003 ; Ligozat, Wickman & Hamza, 2011; Ligozat, Lundqvist & Amade-Escot, 2018). Dans ce cadre, différentes dimensions des pratiques d'enseignement et d'apprentissage sont explorées : quelle est la nature des savoirs produits en classe ? Selon quel processus ces savoirs se construisent-ils ? Quel est le rôle de l'enseignant, quelle est la place des élèves dans ce processus ? Comment les enseignants incorporent-ils les prescriptions institutionnelles à leurs pratiques ?

Dans notre travail, ces interrogations portent sur des pratiques de classe relevant de contextes institutionnels contrastés. À l'école obligatoire, l'enseignement scientifique en France et en Suisse romande fait état de différences significatives : les textes prescriptifs (programmes en France, plans d'études et moyens d'enseignement en Suisse romande), la formation des enseignants (spécialistes et polyvalents) et les modes de recrutement sont pris dans des cultures scolaires et des traditions curriculaires différentes, spécifiées par l'histoire de chacun des systèmes éducatifs. L'étude des pratiques d'enseignement / d'apprentissage dans chacun de ces contextes doit permettre de mettre en évidence des projets d'enseignement distincts, dans lesquels il est possible de repérer des modes de transposition spécifiques, modes de transposition susceptibles d'être mis en relation avec des pratiques scientifiques de référence dans un second temps.

Notre recherche conjugue donc plusieurs plans de comparaison interinstitutionnels :

- une comparaison entre ordres d'enseignement : le primaire (où officie un enseignant polyvalent) et le secondaire inférieur (où officie un enseignant spécialiste) ;
- une comparaison entre systèmes éducatifs étatiques : la Suisse romande et la France.

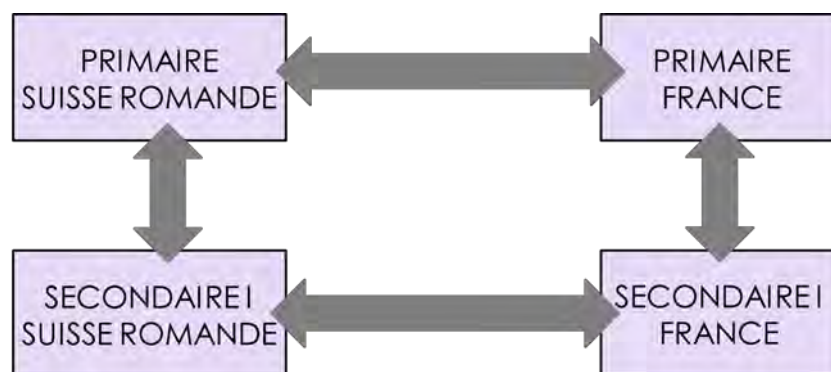


Figure 1 : Résumé des plans de comparaison de la recherche

Pour mener à bien ce travail de recherche, nous nous appuyons sur l'observation de pratiques d'enseignement dans quatre classes ordinaires : deux en France (une au primaire et une au secondaire inférieur) et deux classes en Suisse romande (une au primaire et une au secondaire inférieur). Dans l'ensemble des contextes, la thématique d'enseignement / apprentissage concerne les propriétés de la matière, et en particulier les états et changements d'état de l'eau,

qui recouvrent des phénomènes déjà familiers aux élèves mais pour lequel les modèles à saisir restent complexes.

L'architecture globale de manuscrit de thèse présente cinq grandes parties.

Dans une première grande partie, nous développons les outils conceptuels nécessaires pour mener les analyses didactiques des pratiques de classe. Dans le premier chapitre, nous exposons les outils fournis par la modélisation de l'action conjointe en didactique, d'une part et l'approche pragmatiste des rapports aux objets, d'autre part (Chapitre 1). Dans le second chapitre, nous nous intéressons aux savoirs épistémologiques et didactiques relatifs à l'enseignement des sciences physiques à l'articulation primaire - secondaire (incluant une revue de littérature concernant les propriétés de la matière) (Chapitre 2). Dans le troisième chapitre, nous présentons les contextes institutionnels de l'enseignement des sciences physiques en France et en Suisse romande, à travers une analyse des textes prescriptifs (Chapitre 3). Cette première grande partie s'achève par l'exposé de nos questions de recherche (Chapitre 4).

Une seconde partie de ce manuscrit est consacrée à la présentation de la méthodologie de la recherche (Chapitre 5). Nous y justifions la constitution et la fabrication des traces sur lesquelles nous développons les analyses empiriques.

La troisième partie du manuscrit se consacre à la présentation des savoirs en jeu dans les pratiques observées (vapeur d'eau, eau liquide, évaporation, ébullition, condensation) et des obstacles épistémologiques du point de vue des élèves. Le repérage des obstacles épistémologiques constitue le premier niveau de l'analyse a priori des savoirs en jeu (Chapitre 6).

La quatrième partie est une partie empirique dévolue à l'exposition des résultats de la recherche dans les deux classes du primaire à Genève (Chapitre 7) et en France (Chapitre 8) et les deux classes du secondaire inférieur à Genève (Chapitre 9) et en France (Chapitre 10).

Dans la cinquième et dernière partie de discussion, nous mettons en évidence les formes d'épistémologie pratique des enseignants, d'une part et nous formalisons des phénomènes dont nous estimons qu'ils possèdent une portée générique, d'autre part, phénomènes qui concernent les conditions générales d'une continuité entre rapports aux objets construits par les élèves et rapports aux objets visés par l'enseignant (Chapitre 11).

La conclusion générale de la thèse revient sur les réponses apportées aux questions de recherche, sur les apports et les limites de notre travail et sur les perspectives qui s'en dégagent.

Chapitre 1 ANALYSE DIDACTIQUE DES PRATIQUES D'ENSEIGNEMENT ET D'APPRENTISSAGE

Ce chapitre présente une partie des arrière-plans théoriques sous-tendant notre problématique et notre méthodologie de recherche. Dans un premier temps, nous passons en revue les concepts fondateurs de l'analyse didactique des pratiques d'enseignement et d'apprentissage tels qu'ils se sont développés depuis les années 1970 (transposition didactique, contrat didactique, milieu). Dans un second temps, nous montrons comment le sens de ces concepts s'est reconfiguré au cours du temps sous l'influence de nouvelles sources d'inspiration (l'interactionnisme social, le pragmatisme). Enfin, nous dévoilons les différents systèmes de descripteurs qui accompagnent la modélisation de l'action conjointe de l'enseignant et des élèves.

1.1 L'analyse des pratiques d'enseignement et d'apprentissage en didactique : concepts fondateurs

1.1.1 Le point de vue didactique sur les pratiques d'enseignement et d'apprentissage

Le point de vue que nous adoptons pour traiter des pratiques d'enseignement et d'apprentissage est didactique : nous postulons que ce sont « les savoirs enseignés [qui] spécifient les interactions observables dans le monde scolaire de manière irréductible » (Mercier, Schubauer-Leoni & Sensevy, 2002, p. 7). Cette focalisation épistémique est au centre du champ des recherches en didactique, tel que développé depuis le début des années 1970. Quelques rapides considérations nécessitent d'être rappelées à propos de ce courant de recherche dans lequel nous nous inscrivons.

Le champ des didactiques à la croisée de plusieurs finalités

L'histoire du champ des didactiques montre qu'il s'est parfois situé à la croisée de plusieurs finalités : par un travail pratique et normatif, il peut viser à transformer les pratiques de classe en proposant des contenus nouveaux ou des moyens d'enseignement alternatifs, ou bien en concevant des formations destinées aux enseignants ; par un travail descriptif et critique, il peut s'inscrire dans une intention d'intelligibilité des pratiques de classe et déboucher sur des modélisations originales qui permettent de dépasser la lecture empiriques des pratiques professionnelles (Marcel, Olry, Rothier-Bautzer & Sonntag, 2002). Le découplage de ces deux facettes est d'autant plus complexe que certains concepts (ingénierie didactique, analyse a priori, etc.) existent dans les institutions de formation *et* de recherche, en y prenant des fonctions différentes.

Dans son histoire, le champ de recherche en didactiques s'est donc trouvé en tension, entre la mise au point « d'outils » ou de « méthodes » pour enseigner dans la classe et l'ambition théorique qui vise à constituer une « science » de description et d'interprétation des phénomènes didactiques (Schneuwly, 2011).

Émancipation du champ des didactiques par rapport aux autres sciences humaines

Le champ des didactiques s'est constitué en postulant que le domaine de réalité des pratiques d'enseignement et d'apprentissage n'est pas « couvert » de façon satisfaisante par les théories déjà-existantes (psychologie, pédagogie, linguistique, sociologie, etc.) : celles-ci laissent des points aveugles tels, qu'elles ne permettent pas de décrire et d'interpréter efficacement les phénomènes en jeu. Dans un texte rétrospectif qui retrace l'émergence de la didactique des mathématiques, Brousseau (2004) fait remonter ce problème à la pédagogie générale de Comenius pour qui « traditionnellement, « ce qu'il y a à savoir » et « comment » devaient être dissociés » (p. 1) et donc, finalement pour qui « une méthode unique suffit pour toutes les matières » (p. 1). La centration sur les savoirs en jeu, consubstantielle à l'émergence du champ des didactiques se pose évidemment en opposition avec ce point de vue. Mais ce mouvement d'émancipation par rapport à la pédagogie générale en rejoint d'autres : « Les didactiques des disciplines se sont caractérisées par des mouvements d'autonomisation et de refus de toute approche applicationniste depuis la psychopédagogie issue, pour l'essentiel, des travaux piagétien en psychologie du développement » (Schubauer-Leoni, 2008, p. 168). Brousseau (2004) affirme que les aspects essentiels des phénomènes propres à la diffusion d'une discipline ne peuvent être déterminés qu'à l'aide de concepts autonomes (c'est-à-dire non réductibles à ceux des autres sciences humaines). En particulier, « une situation didactique n'est pas bien décrite par la juxtaposition des études réduites à ces différents domaines [anthropologie, sociologie, psychologie, linguistique]. La psychologie, par exemple, ne peut pas légitimement envisager des mathématiques différentes de celles qui lui ont été choisies par les mathématiciens » (Brousseau, 2011, p. 5).

Autrement dit, le champ des didactiques ne peut pas être considéré comme une sous-discipline des autres sciences humaines. Même s'il emprunte certains de leurs concepts, il est une science émergente, avec des questionnements et des résultats originaux, qui n'auraient pas pu prendre racine au sein des disciplines scientifiques de référence.

Au cœur du champ des didactiques : le système didactique

Le système didactique peut être défini comme le système de relations qui s'établissent entre l'enseignant, l'élève et le savoir, sous couvert d'institutions dotées d'intentions d'enseigner. Le champ des didactiques considère que le système didactique constitue le découpage fondateur du domaine de réalité auquel sa recherche s'attelle, dans la mesure où il permet de penser la reconstruction des savoirs en classe comme des processus sociaux.

Cependant, les modèles d'analyse qui permettent de tenir ensemble les trois pôles du système didactique se sont avérés complexes à développer :

« Bien que réunis sous la bannière (!) du contrat didactique, les acteurs impliqués dans le champ de la didactique des mathématiques continuent de privilégier l'une ou l'autre entrée dans le système didactique : l'entrée par les situations d'une part et l'entrée par les sujets apprenants d'autre part. Quant à l'entrée par l'enseignant, si cette instance fait bien partie de la modélisation didactique, elle n'a en revanche fait l'objet d'une problématisation spécifique

et surtout de recherches empiriques que récemment » (Schubauer-Leoni, 1998, p. 339)

L'histoire des travaux en didactique montre ainsi une focalisation sur l'action de l'élève, ou bien sur le fonctionnement des savoirs, puis ensuite seulement sur l'action de l'enseignant, sans parvenir à concilier ces approches dans une perspective systémique. Nous mettrons en avant plus bas que la description du fonctionnement du système didactique et des phénomènes qui lui sont propres tire profit à être envisagée sous l'angle du caractère conjoint des actions de classe.

1.1.2 La transposition didactique

Pour Chevallard (1999), « La TAD [théorie anthropologique du didactique] situe l'activité mathématique (...) dans l'ensemble des activités humaines et des institutions sociales » (p. 223). La théorie de la transposition permet notamment de penser ce qui s'enseigne dans la classe en relation avec les savoirs en usage au-dehors.

Explorons certains aspects de cette théorie.

Savoir, pratique sociale, institution

La théorie de la transposition didactique s'appuie sur une définition praxéologique du savoir. Un savoir renvoie à des pratiques, des usages, des savoir-faire qui contribuent à le définir : « Tout savoir est, pour l'acteur, d'abord savoir en acte. Tout savoir est pratique sociale » (Chevallard, 1994, p. 25). Corollairement, toute pratique sociale se niche dans une institution qui lui assure un cadre et lui donne sa fonction et sa raison d'être. En conséquence :

« Tout savoir S est ainsi attaché à une institution I au moins, dans laquelle il est mis en jeu dans un domaine de réalité D. Le point essentiel est alors qu'un savoir n'existe pas in vacuo, dans un vide social : tout savoir apparaît, à un moment donné, dans une société donnée, comme ancré dans une ou des institutions » (Chevallard, 1989, p. 213).

Dans les termes de Chevallard, il est possible d'assimiler un corps de savoirs à un réseau de techniques et de discours sur ces techniques, réseau mis en œuvre par un groupe social dans une institution donnée. Ces éléments peuvent partager un « air de famille » avec ceux de plusieurs autres institutions : en effet, le savoir d'une institution n'est pas clos sur lui-même et bénéficie de l'inspiration des savoirs mis en œuvre dans les autres institutions. Ainsi, certains savoirs mathématiques sont repris par des musiciens, des géographes, des économistes, etc. Certains savoirs relatifs aux sciences physiques sont réutilisés par des chimistes, des ingénieurs, des chercheurs en sciences de l'information et de la communication, des groupes de défense de l'environnement, etc. Et évidemment, l'institution scolaire reprend, d'une manière ou d'une autre, des savoirs mathématiques ou relatifs aux sciences physiques.

Dans cette perspective, comment les savoirs passent-ils d'une institution à l'autre ?

La transposition institutionnelle

Puisque le savoir ne peut exister indépendamment de pratiques sociales qui lui donnent forme, il n'est plus permis de penser que le savoir passe d'une institution à l'autre, comme si c'était

une « marchandise » qui transitait simplement d'un lieu à l'autre. C'est bien l'écueil que dénonce Chevallard (1994) :

« La difficulté est bien qu'en posant ainsi le problème [le savoir comme bien matériel] nous sommes au risque d'oublier qu'on ne parle jamais de savoir que par métonymie. La partie – le savoir – désigne un tout qui inclut aussi domaine de réalité et pratique sociale. Ce que nous nommons savoir représente, au sens diplomatique du terme, un domaine de réalité et ses sous-domaines en même temps qu'un système de pratiques sociales, dont ce savoir est à la fois un émergent et une condition ; (...) En faisant donc du savoir une hypostase de cette trinité, nous poserions mal, au double niveau théorique et pratique, le problème de la transposition didactique. Ce qui doit être transposé est bien cette « trinité » – domaine de réalité, pratique, savoir – dont l'ensemble ne peut exister, à l'instar d'un nœud borroméen, si l'un quelconque de ses éléments se perd » (p. 26)

Mais la « trinité » dont parle Chevallard (domaine de réalité, pratique, savoir) ne se retrouve pas à l'identique dans l'institution de production et dans l'institution d'emprunt. Les économistes, qui voient l'opportunité de se saisir de certaines parties des mathématiques, traitent d'un domaine de réalité tout autre (les activités humaines de production, de distribution, d'échange et de consommation de biens et de services) et l'institution qui les abrite possède des finalités bien spécifiques (par exemple, modéliser ces activités humaines). Il s'agit donc de transformer les savoirs de l'institution de production pour qu'ils conviennent au domaine de réalité et aux finalités de l'institution d'emprunt. Au final, ce mouvement contribue à définir un nouveau savoir dans l'institution d'emprunt, au sens chevallardien d'une nouvelle « trinité » : savoir, pratique sociale, domaine de réalité. C'est la raison pour laquelle les savoirs de l'institution d'emprunt ne doivent être considérés ni comme des copies à l'identique ni comme des versions appauvries des savoirs de l'institution d'origine. Ils constituent en fait des constructions originales qui se sont adaptées au domaine de réalité et aux finalités de l'institution dans laquelle ils s'enracinent.

La transposition didactique des savoirs

Dans ce cadre, la transposition didactique des savoirs correspond au « phénomène qui caractérise la transformation adaptative des savoirs pour qu'ils puissent 'vivre' dans les conditions écologiques des pratiques didactiques, c'est-à-dire ailleurs que dans les pratiques initiales de production des savoirs » (Schubauer-Leoni, 2008, p.170). Les savoirs qui « s'établissent » dans l'espace scolaire ont subi des transformations spécifiques qui les rendent aptes à s'intégrer dans les pratiques d'enseignement et d'apprentissage : division en champs de savoir (désyncrétisation) ; séparation du savoir et de son contexte de production (dépersonnalisation et décontextualisation) ; programmabilité de l'acquisition du savoir ; contrôle social des apprentissages, etc. Ce sont ces contraintes du fonctionnement des institutions scolaires qui conditionnent l'existence des savoirs en son sein. Au final, comme dans tout effet de transposition, des pratiques sociales et un domaine de réalité propres aux « mathématiques à l'école » ou aux « sciences physiques à l'école » se construisent à partir des

efforts d'accommodation des savoirs de référence aux finalités et aux contraintes de cette institution.

La finalité principale du système éducatif en tant qu'institution est la transmission des œuvres culturelles dont la jeune génération a besoin afin d'agir de manière adéquate au sein de la société et de répondre aux nouveaux défis à venir. Cette définition permet un large espace d'interprétation qui est la cause de débats sur la nature des œuvres culturelles candidates à l'entrée dans la sphère scolaire. Il existe en effet une multiplicité de références potentielles vis-à-vis de ces œuvres culturelles : Johsua (1996) met en lumière des sources de production des savoirs qui ne répondent pas à des critères académiques et propose de recourir à des « savoirs experts » comme fondement des savoirs scolaires ; Martinand (1986) décrit plusieurs « pratiques sociales de référence » dont les pratiques d'ingénierie, de production industrielle ou artisanale, les activités domestiques, les activités culturelles, idéologiques ou politiques. La transposition consiste en premier lieu à choisir, bien au-delà de la sphère académique, la ou les institution(s) de référence pour une discipline donnée. D'une culture à l'autre, ces choix de transposition peuvent donner lieu à des configurations très variées, au niveau des programmes et des pratiques de classe. C'est ce que l'analyse comparatiste primaire/secondaire et France/Suisse romande que nous menons doit révéler.

Qu'est-ce que la théorie de la transposition apporte pour l'analyse des pratiques d'enseignement et d'apprentissage ?

Les bénéfices de l'approche en termes de transposition ont été mis en avant par Chevallard :

« L'interrogation autour du thème de la transposition didactique, précisément, eut cette vertu d'ouvrir une nouvelle voie de problématisation, de frayer une piste à l'enquête à partir d'un point de départ qui n'avait pas été reconnu comme tel, et que tout nous poussait, culturellement, à méconnaître. (...) [La transposition didactique constitue] le moteur d'une véritable déconstruction du réel, le moyen d'une subversion des évidences et un outil de notre propre déconditionnement » (Chevallard, 1994, p. 2-3)

Quel est ce nouvel espace de problématisation que la théorie de la transposition didactique permet de faire apparaître ?

Questionner l'illusion de la transparence des savoirs et problématiser les savoirs de l'école

Avant la théorie de la transposition didactique, la « vision substantialiste des œuvres culturelles, qui pourraient vivre hors de toute pratique sociale » (Schubauer-Leoni, 2008, p. 171) a consacré l'idée que l'on pouvait enseigner et apprendre des objets de savoir par transmission directe d'un émetteur à un récepteur et par transfert simple d'une institution à une autre. Cette idée en a engendré d'autres : d'abord une croyance en une identité, une superposition entre le savoir de référence et le savoir de l'enseignement et corollairement une naturalisation des savoirs scolaires. La théorie de la transposition permet de se détacher de ces deux idées :

« De façon générale, la question génératrice de la théorie de la transposition institutionnelle est : « Quelle est cette "chose" (...) que l'on désigne, en cette institution, d'un nom que l'on retrouve employé en telle ou telle autre

institution, et quelles relations ces choses homonymes ont-elles entre elles ? » Jusque-là, en effet, s'imposait comme un postulat irréfragable la réponse : l'une et l'autre chose sont la même chose. La théorie de la transposition rompt avec cette fiction » (Chevallard, 2007, p. 12)

Nous avons souligné que le savoir est indissociable des pratiques sociales et du domaine de réalité dont il se préoccupe au sein d'une institution donnée, d'une part et que les savoirs constituent des constructions originales qui s'accordent aux finalités de l'institution dans lesquels ils vivent, d'autre part. Dans ce cadre, il est évident que les savoirs scolaires ne peuvent pas se superposer aux savoirs savants : l'illusion de la transparence est levée. D'autre part, la contingence des savoirs scolaires est révélée : ils apparaissent désormais comme un possible parmi d'autres possibles. Et c'est à partir de ces déconstructions qu'un espace de problématisation se dessine : pourquoi ces savoirs scolaires particuliers sont-ils dans le curriculum alors qu'ils pourraient ne pas y être ? Pourquoi sont-ils enseignés de cette manière alors que d'autres manières seraient possibles ? Selon Chevallard (1999) :

« L'illusion de « naturalité » de l'ordre institutionnel est, dans le registre de l'action, la racine de beaucoup de conservatismes et le fourrier de beaucoup d'impuissances. (...) Par contraste, le questionnement écologique permet de ré-interroger l'ordre des choses existant. (...) La problématique écologique apparaît ainsi comme le fondement *d'un art du possible* » (p. 264)

Le processus de transposition s'affirme donc comme le moteur qui permet de problématiser et de questionner des savoirs scolaires qui jusque-là passaient pour naturels et indiscutables. C'est la question de la légitimation des savoirs qui s'ouvre au débat.

Redécouvrir la genèse sociale et historique pour penser une genèse scolaire artificielle

Puisque l'école vise à transmettre à la jeune génération la connaissance des œuvres culturelles déjà-là, Chevallard rappelle qu'étudier une question, c'est « étudier une réponse O déjà produite, en quelque autre institution », c'est-à-dire « une œuvre existant ailleurs dans la société » (Chevallard, 1999, p. 241). Au sein d'une institution particulière, un problème général s'est posé dans un domaine (en mathématiques, en physique, etc.), et une solution à ce problème a été reconnue suffisamment valable pour qu'elle soit diffusée (à l'écrit) et transmise de génération en génération : autrement dit, elle s'est constituée en savoir et sédimentée dans la culture. À un moment donné, l'école a estimé que ce savoir méritait d'apparaître dans le curriculum. Mais, le nœud de la difficulté réside dans le fait, que selon Chevallard, le processus de transposition a eu un effet pervers majeur :

« Le rapport entre question et réponse tend à s'inverser. La réponse est première, la question suit. (...) L'étude de l'œuvre tend ainsi à créer une organisation de savoir qui semble ne plus exister que pour elle-même. (...) Dans le même temps, les raisons d'être de l'œuvre tendent à se perdre » (Chevallard, 1999, p. 242)

Autrement dit, le type de transformation que le savoir a subi pour être transposé dans l'institution scolaire (décontextualisation, dépersonnalisation, découpage, etc.) entraîne une inversion de la question et de la réponse dans la présentation du savoir, ce qui décale d'autant

plus l'accès des élèves aux causes de l'existence d'un tel savoir. Pire, les questions sont parfois totalement occultées :

« Les réponses R cessent d'être regardées comme telles et se trouvent hypostasiées en œuvres de la culture ayant valeur en soi et pour soi, œuvres dont les raisons d'être – d'être là, dans la culture, mais aussi dans le programme scolaire – se sont perdues. (...) Lorsque l'école travaille ainsi sur des œuvres devenues étrangères à elles-mêmes, ceux que l'on réunit autour de l'œuvre à étudier se rassemblent autour d'un abîme de sens. » (Chevallard, 2007, p. 21-22)

Autour de cet « abîme de sens », les savoirs scolaires sont alors présentés sous formes de propositions connectées à d'autres propositions, mais déconnectées des problèmes qui leur ont donné naissance : ni véritablement théoriques ni véritablement pratiques, ce sont des pseudo-savoirs (Astolfi, 1992b). Chevallard (2007) défend alors un programme scientifique de réflexion sur la nature des savoirs présents à l'école :

« Le programme scientifique peut *a priori* s'énoncer en peu de mots : faire entendre à nouveau les œuvres à enseigner comme des réponses à certaines questions, ou du moins comme des instruments pour produire de telles réponses ; inscrire ces questions au fondement de leur étude scolaire, les établir à l'École comme génératrices de la connaissance qui s'y déploie. » (p. 23)

Ces considérations amènent à questionner les conditions d'introduction des savoirs qui permettent de conserver leur sens : dans un autre contexte, Brousseau (2004) affirme qu'il est évident que « celui qui reçoit une connaissance ne doit pas seulement la citer ou la réciter mais la « reproduire », c'est-à-dire la produire à nouveau, comme une création personnelle » (p. 1). Autrement dit, il s'agit de penser une genèse artificielle des savoirs dans le cadre scolaire : c'est par un mouvement de re-personnalisation et de re-contextualisation que le savoir peut arriver à vivre à nouveau au sein des systèmes scolaires.

Si nous nous intéressons à l'élucidation des pratiques didactiques ordinaires, Schubauer-Leoni & Leutenegger (2005) plaident pour une prise en compte de la genèse socio-historique et institutionnelle des savoirs :

« Sans poser la question de la genèse socio-historique et institutionnelle des œuvres, et donc des pratiques sociales et culturelles qu'elles comportent, on ne peut ni penser une genèse « artificielle » à travers laquelle des élèves pourraient redécouvrir des éléments essentiels des œuvres, ni comprendre ce qui se passe dans le didactique ordinaire. Dans une classe « quelconque », il s'agit en effet d'élucider, à partir des systèmes de tâches proposées aux élèves, dans quelles pratiques scolaires effectives ils sont engagés, avec quels effets sur le plan des connaissances et avec quel lien de légitimité à l'égard des pratiques de référence » (p. 414)

La comparaison entre les problèmes portés par les institutions de référence d'une part et les situations dans lesquelles les élèves sont plongés d'autre part instruisent ces dernières en permettant de mettre en lumière les potentialités et les limites qui caractérisent les situations de

classe. Sur ce dernier point, nous postulons, avec d'autres (Assude & Mercier, 2007 ; Schubauer-Leoni, 2002) que les pratiques ordinaires d'enseignement et d'apprentissage gagnent en intelligibilité lorsqu'une modélisation théorique des savoirs et des situations dans lesquelles ils sont mis en jeu est menée, notamment à travers une analyse a priori. Nous reviendrons plus bas sur la description et sur les modalités de la mise en application de l'analyse a priori (cf. 1.4).

Au final, la théorie de la transposition didactique apporte plusieurs bénéfices pour l'étude des phénomènes d'enseignement et d'apprentissage : elle permet de questionner l'illusion de la transparence des savoirs, de problématiser les savoirs de l'école et de penser une genèse scolaire artificielle de re-construction des savoirs en référence à une genèse socio-historique de construction des savoirs.

1.1.3 Le milieu et le contrat : définitions premières

Dans le cadre de la théorie des situations didactiques en mathématiques (TSDM) élaborée à partir des années 1980, Brousseau élabore deux concepts majeurs : le milieu et le contrat didactique.

Le milieu : définition première

Le milieu forme « tout ce qui agit sur l'élève et/ou ce sur quoi l'élève agit » (Brousseau, 1998/2010, p. 3). C'est l'ensemble des objets matériels, langagiers et symboliques que les élèves ou l'enseignant manipulent.

Dans le cadre de la TSDM, le milieu constitue le système antagoniste de l'élève en lui fournissant les rétroactions qui permettent la validation ou l'invalidation de ses stratégies. Selon Brousseau, l'élève apprend en s'adaptant à un milieu, producteur de contradictions, de difficultés, de déséquilibres :

« C'est ce système antagoniste que nous avons choisi d'appeler milieu. Il joue donc un rôle central dans l'apprentissage comme cause des adaptations et dans l'enseignement comme référence et objet épistémologique »
(Brousseau, 1990, p. 321)

La modélisation du milieu selon la TSDM trouve donc sa source d'inspiration dans l'apprentissage par adaptation, chère à l'épistémologie génétique de Piaget : au sein de ce paradigme, c'est l'interaction permanente entre le sujet et son environnement qui permet de construire des connaissances. Quand le sujet rencontre un obstacle, pour lequel le processus d'assimilation n'est plus adapté, il est contraint de s'accommoder, c'est-à-dire de modifier et de réorganiser ses schèmes pour répondre à la spécificité de la situation. À travers la confrontation avec une succession de situations, le sujet témoigne d'une adaptation croissante à son environnement, ce qui constitue l'apprentissage. La TSDM intègre aussi certains des apports du paradigme socio-constructiviste : l'obstacle qui provoque l'accommodation peut prendre la forme de conflits ou de débats entre pairs. Lorsque le sujet confronte ses propositions à celles des autres membres du groupe, celles-ci forment un autre genre d'antagonisme nécessaire à l'apprentissage.

Au sein de la situation a-didactique, « l'action de l'élève n'[est] produite et justifiée que par les nécessités du milieu et par ses connaissances, et non par l'interprétation des procédés didactiques du professeur » (Brousseau, 1998/2010, p. 5). Le milieu a-didactique peut donc être considéré comme un espace de ressources et de contraintes censé organiser les actions des élèves de manière quasi-inéluctable.

Dans ce cadre, le rôle de l'enseignant est, dans un premier temps, de choisir judicieusement les situations qu'il propose pour provoquer chez les élèves les adaptations souhaitées : il doit aménager et organiser les milieux tels que l'adaptation des élèves face à eux fasse émerger les connaissances qu'il a prévues de faire approprier en amont. Une fois que les élèves ont réussi à mobiliser les connaissances visées, il doit, dans un second temps, les diffuser et les instituer, afin de les rendre légitimes comme manières de faire et de penser dans la suite de l'action en classe : c'est de cette manière que l'enseignant signifie aux élèves les savoirs qui sont les enjeux de la situation et qu'il leur faut retenir.

Le contrat didactique : définition première

Brousseau propose plusieurs facettes de la notion de « contrat didactique » : le contrat didactique modélise le décodage et l'interprétation de la situation par l'élève qui le rend en mesure d'amorcer une action dans le milieu ; le contrat didactique fait appel aux normes et habitudes vis-à-vis des objets de la situation ; le contrat didactique révèle également l'horizon d'attentes qui existe entre enseignant et élèves. Nous choisissons de dissocier chacune de ces facettes dans l'exposition de la notion de « contrat didactique ».

Le contrat didactique comme décodage et interprétation des situations

Dans la classe, les savoirs avancent et ce qui fait l'objet d'un enseignement aujourd'hui sera considéré comme un acquis demain : cette évidence nous rappelle que les tâches, questions, problèmes, etc. proposés aux élèves sont toujours nouveaux de leur point de vue. Pour les résoudre, l'élève ne dispose pas de procédures toutes faites, il ne peut pas engager une action automatisée : sinon, il n'y aurait rien de nouveau à apprendre. Les systèmes de tâches proposés aux élèves en classe enrayent leurs habitudes d'actions : ils introduisent une discontinuité dans leur expérience. Empêché d'agir « comme d'habitude », l'élève a affaire à quelque chose d'indéterminé qu'il doit interpréter s'il veut pouvoir continuer à agir. Le contrat didactique peut se définir comme la marge d'interprétation de la tâche qui est à la charge de l'élève et qui conditionne son engagement dans une action portée par des enjeux propres :

« Au cours d'une séance ayant pour objet l'enseignement à un élève d'une connaissance déterminée (situation didactique), l'élève interprète la situation qui lui est présentée, les questions qui lui sont posées, les informations qui lui sont fournies, les contraintes qui lui sont imposées (...) [Le contrat didactique] est la règle de décodage de l'activité didactique par laquelle passent les apprentissages scolaires. On peut penser qu'à chaque instant, les activités d'un enfant dans un processus dépendent du sens qu'il donne à la situation qui lui est proposée, et que ce sens dépend beaucoup du résultat des actions répétées du contrat didactique » (Brousseau, 1980a, p. 127-128)

C'est donc le contrat didactique qui conditionne la signification de la situation pour l'élève, et par-delà ce qu'il doit entreprendre dans le milieu. Comme le souligne Johsua (1988), « il n'y a jamais de relation directe de l'élève et du savoir ; il s'agit toujours d'une relation médiée, par l'intermédiaire justement du contrat didactique » (p. 38). Au final, le contrat didactique modélise le chaînon manquant entre la tâche proprement dite (et sa consigne) et l'action de l'élève : en cela, il s'agit d'une construction théorique capable d'expliquer et de rendre compte des observations faites en classe mais qui, par définition, ne peut se révéler de façon directe et doit être inférée des actions des protagonistes.

Le contrat didactique comme faisant appel aux usages habituels des objets du milieu

Brousseau poursuit sa définition en révélant les invariants sur lesquels les élèves s'appuient pour organiser leur action : il s'agit de « ce que le maître reproduit, consciemment ou non, de façon répétitive dans sa pratique de l'enseignement » (Brousseau, 1980a, p. 127), « des constantes de la façon d'enseigner du maître » (Brousseau, 1980b, p. 181). En résumé : « Le contrat didactique se présente donc comme la trace des exigences habituelles du maître (exigences plus ou moins clairement perçues) sur une situation particulière. » (Brousseau, 1980a, p.128). Ce sont donc les usages habituels, spécifiques des objets qui sont présents dans la tâche, qui orientent l'interprétation des élèves sur ce qu'il y a à faire dans le milieu : au fil du temps didactique, ces habitudes spécifiques se sédimentent en normes et en règles implicites qui régulent le rapport que les élèves entretiennent avec les objets du milieu. Autrement dit, le contrat didactique est un cadre interprétatif évolutif qui permet la négociation du sens des objets du milieu par les élèves et l'enseignant.

Le contrat didactique comme horizon d'attentes de l'enseignant et des élèves

Le contrat didactique révèle également l'horizon d'attentes qui existe entre enseignant et élèves : il représente à la fois « l'ensemble des comportements de l'enseignant qui sont attendus de l'élève » et « l'ensemble des comportements de l'élève qui sont attendus de l'enseignant. » (Brousseau 1980a, p. 127). En réponse à ces attentes supposées et réciproques, les deux partenaires de l'action didactique engagent une action dans le milieu : lorsque des divergences apparaissent entre les lignes d'action de l'enseignant et des élèves, c'est le signe d'une rupture du contrat didactique. Dans ce cas, certaines des règles du contrat qui demeuraient implicites jusque-là se dévoilent : « C'est en effet dans ces cas de violation du pacte que certaines règles sont alors énoncées et que la nature du contrat apparaît » (Schubauer-Leoni, 1988, p. 66). Les ruptures du contrat didactique dévoilent les différents enjeux que poursuivent les protagonistes de la classe, à partir desquels les chercheurs peuvent remonter au sens qu'ils donnent à la situation dans laquelle ils sont placés et donc à certaines dimensions du contrat didactique.

Les dimensions pérennes et évolutives du contrat didactique

La notion de contrat didactique s'est reconfigurée, notamment au sein de la théorie anthropologique du didactique portée par Chevallard qui le replace au sein des institutions dans lesquelles les savoirs sont mis à l'étude :

« L'entrée d'un *individu concret* dans une institution est contemporaine de son entrée dans un contrat : pour l'institution que constitue l'école moderne, le contrat didactique. » (Chevallard, 1988, p. 23)

Chevallard donne un exemple de contrat « primitif », en vigueur dès l'entrée à l'école, qui concerne le rapport à réinventer, en tant qu'élève, à l'idée de « question » :

« Le maître ne demande pas à l'élève « Combien font 2 fois 8 ? » parce que ce serait là, pour lui, une manière (...) de savoir (enfin) combien font 2 fois 8 : il s'agit pour lui, bien sûr, de vérifier si l'élève, lui, le sait. Les questions de l'enseignant relatives au savoir enseigné sont ainsi de fausses questions – et c'est même à ce fait qu'il pose de fausses questions qu'on peut l'identifier, instantanément, comme étant l'enseignant. » (Chevallard, 1988, p. 26)

Dans le cadre familial, une question appelle une information manquante à fournir² : elle présuppose l'ignorance du demandeur à son propos. Dans le cadre scolaire, une question possède une visée didactique : il s'agit de faire apprendre à l'élève un savoir que l'enseignant possède déjà. La réalisation de la bifurcation entre le sens d'une question dans le cadre familial et son sens dans le cadre scolaire constitue la première interprétation de ce qu'il y a à faire (et donc, à répondre) dans la situation : c'est une dimension fondatrice du contrat didactique, très robuste car elle se maintient tout au long de la scolarité.

Mais une partie du contrat évolue, par des déclarations explicites de l'enseignant mais aussi par de nouvelles pratiques didactiques mises en œuvre : de nouveaux milieux, de nouvelles consignes didactiques imposent des tâches qui, toujours, contraignent les élèves à devoir dépasser leurs routines et les connaissances qui y sont associées. Les usages relatifs aux objets de savoir se modifiant en permanence, les règles implicites du contrat sont sans cesse redéfinies dans l'interaction entre l'enseignant et les élèves : « Les élèves apprennent leur métier, sur le tas, grâce au décodage renouvelé de différents contrats didactiques en vigueur » (Schubauer-Leoni, 1988, p. 71).

Au final, le contrat didactique possède plusieurs dimensions qui ne sont pas établis pour les mêmes intervalles de temps : certaines dimensions sont pérennes et s'établissent pour l'ensemble de la scolarité ; d'autres se stabilisent le temps d'une séquence ou d'une séance sur un thème donné. Selon Tiberghien & Venturini (2016), appréhender ces différentes dimensions du contrat didactique nécessite de recourir à des méthodologies qui font intervenir plusieurs échelles temporelles.

Les implicites du contrat didactique

Un dernier point mérite d'être souligné : le contrat didactique, comme le contrat de communication³, ne possède pas tous les attributs d'un contrat réel, en particulier parce qu'il existe des non-dits, des implicites concernant les droits et devoirs de chacun. Cependant, ces non-dits ne possèdent pas le même statut dans le contrat didactique et le contrat de

² Elle peut aussi être de nature injonctive.

³ Terme employé dans la recherche linguistique et sémiotique pour désigner le fait qu'un acte de communication se déploie en suivant certaines règles inhérentes à la communication entre individus.

communication. Les implicites du contrat de communication concernent l'arrière-plan commun indispensable au maintien de la situation de communication : on ne peut communiquer que parce qu'une grande partie des rapports aux objets dont on parle est partagée. Dans le cas didactique, Brousseau affirme cependant :

« Le contrat didactique n'est pas en fait un vrai contrat car il n'est pas explicite, ni librement consenti, et parce que ni les conditions de ruptures, ni les sanctions ne peuvent être données à l'avance puisque leur nature didactique, celle qui importe, dépend d'une connaissance encore inconnue des élèves » (Brousseau, 1998/2010, p. 6)

Autrement dit, puisque les implicites du contrat didactique ne peuvent être pointés que dans les situations de rupture lorsque des savoirs nouveaux sont dévoilés, ils sont incontournables et tiennent à la nature même des pratiques didactiques.

1.2 Le comparatisme en didactique

Notre recherche s'intéresse à l'enseignement et l'apprentissage des propriétés de la matière, notamment les propriétés de l'état gazeux et des changements d'état faisant intervenir l'état gazeux. D'autre part, nous rappelons qu'elle conjugue plusieurs plans de comparaison interinstitutionnels : une comparaison entre le primaire et le secondaire, d'une part et une comparaison entre la Suisse romande et la France, d'autre part. Pourquoi avoir choisi de mener cette étude sous l'angle comparatiste ? Dans cette section, nous retraçons les motivations de l'émergence d'une didactique comparée, ses visées principales en termes de distinction génériques/spécificités et enfin, nous argumenterons que l'approche comparatiste dont nous nous saisissons permet de traiter le processus de transposition de manière plus approfondie.

Motivations d'une didactique comparée : une double défamiliarisation

Plusieurs raisons président au mouvement de création de la didactique comparée, en tant que domaine autonome de recherche. La première concerne la nécessité « d'émancipation épistémologique et institutionnelle de la position du didacticien et de la science didactique qu'il produit vis-à-vis des institutions qui servent d'habitat à ses objets d'étude » (Chevallard, 2007, p. 705). En effet, l'organisation disciplinaire s'impose partout dans les institutions d'enseignement et d'apprentissage : l'organisation de l'étude, les programmes, les manuels, les référentiels de compétence de la formation des enseignants structurent le monde de l'enseignement en frontières disciplinaires bien délimitées. Mais, comme le souligne Ligozat (2016, p. 281), « le découpage en termes de disciplines scolaires est un donné des systèmes scolaires répondant en partie à des finalités sociales et politiques ». Ce découpage est ainsi variable d'un contexte à l'autre, selon les visées prioritaires que se fixent les décideurs des politiques éducatives (cf. Marty & Ligozat, accepté). Cette nature partiellement contingente des frontières disciplinaires pousse à remettre en question le fait qu'elles puissent structurer intégralement le travail d'étude des conditions de diffusion des savoirs en termes de didactiques disciplinaires :

« Si l'on admet que l'organisation des savoirs en termes de disciplines scolaires dans les programmes, les manuels, les référentiels de compétences de la formation des enseignants, etc. sont des ressources structurantes pour les acteurs, les questions épistémologiques propres à ces découpages, et leurs conséquences sur les pratiques d'enseignement et d'apprentissage ne peuvent être négligées. Ainsi, on est amené à se poser le problème suivant : en quoi ces « ressources structurantes » pour les acteurs des systèmes didactiques, que sont les organisations disciplinaires, devraient-elles nécessairement structurer intégralement le travail d'étude des conditions d'enseignement, d'apprentissage des savoirs ? Ou pour le dire autrement, le découpage des travaux de recherche et de formation en didactique en fonction des disciplines scolaires permet-il de traiter de l'ensemble des questions que pose la transmission des savoirs dans la société ? » (Ligozat & Leutenegger, en préparation)

À un second niveau, ce découpage en didactiques disciplinaires a entraîné des conséquences importantes au niveau du développement du champ : puisque chaque didactique s'est développée autour des savoirs en jeu dans une discipline donnée, les cadres théoriques, d'une part et les résultats, d'autre part ont progressé de façon autonome pour chacune. C'est pour éviter le repli de chaque didactique sur elle-même que la didactique comparée propose de découvrir « la nécessité de défamiliarisation, voire d'étrangement en vue d'une décentration par rapport à la vision du didactique acquise au travers d'une didactique disciplinaire dans laquelle nous avons mené nos recherches jusque-là » (Mercier et al, 2002, p. 5).

La didactique comparée se réclame donc d'un double processus de défamiliarisation, au premier niveau par rapport à l'emprunt dans le champ de la recherche du découpage institutionnel des savoirs en disciplines scolaires et au second niveau par rapport au cloisonnement théorique que cela implique.

Visées d'une didactique comparée : les dimensions génériques et spécifiques

Par conséquent, le comparatisme vise à contribuer à la construction d'une science du didactique qui prend comme domaine de réalité l'ensemble des pratiques d'enseignement et d'apprentissage et comme unité de découpage privilégiée le système didactique, défini comme le système de relations qui s'établissent entre l'enseignant, l'élève et le contenu d'enseignement.

Le comparatisme permet d'aborder les pratiques d'enseignement et d'apprentissage avec un nouveau regard en fournissant un angle d'étude inédit à leur propos : « Une approche comparatiste permet (...) de poser des questions que chaque didactique prise isolément ne peut traiter » (Schubauer-Leoni et Leutenegger, 2009, p. 244). Au final, ce nouveau point de vue sur les pratiques de classe permet de produire des résultats scientifiques émergents qui n'auraient pas pu être mis au jour autrement, même en s'emparant de l'ensemble des outils théoriques de chacune des didactiques disciplinaires. Cette nouvelle brèche dans les perspectives de recherche nous invite à considérer la didactique comparée comme un « champ théorique et d'intervention à part entière et non pas seulement comme méthode d'enquête » (Schubauer-Leoni et Leutenegger, 2009, p. 244).

Mais les fondateurs de ce nouveau champ nous préviennent d'emblée : il s'agit « d'éviter les apories d'une didactique générale (...) alors que l'essence même de cette didactique comparée réside dans l'hypothèse d'un maillage subtil entre dimensions spécifiques et génériques » (Mercier et al., 2002, p. 8-9). La didactique comparée fait jouer un rôle essentiel à la distinction entre générique et spécifique : « Dans le travail du professeur et dans celui des élèves, qu'est-ce qui est générique et peut être rapporté à un processus d'enseignement (ou d'apprentissage), qu'est-ce qui est spécifique et doit être rapporté à tel ou tel savoir enseigné/appris ? » (Mercier et al., 2002, p. 9). Autrement dit, quelles formes d'action sont inhérentes à la spécificité épistémique du savoir étudié ? Quelles formes d'action relèvent plutôt de manières d'enseigner génériques ?

Ces questions fondamentales délimitent un programme de recherche : les caractéristiques de spécificité et de généricité sont « à sonder au plan des institutions, des groupes et des acteurs, des conditions dans et par lesquelles les objets constitutifs des œuvres culturelles, sont proposés aux sujets censés les étudier et les apprendre » (Mercier et al., 2002, p. 9). Les variations dans la configuration du système didactique permettent de faire émerger plusieurs axes de travail :

- Un premier axe de travail compare les pratiques d'enseignement et d'apprentissage à propos d'objets appartenant à différentes disciplines scolaires ou bien d'objets qui se trouvent à la jonction de plusieurs découpages disciplinaire (par exemple, la modélisation, les grandeurs et mesures, etc.), ou bien encore d'objets pris dans des questions complexes (par exemple, les éducations au développement durable, à la santé, etc.).
- Un second axe de travail interroge la comparaison entre les pratiques d'enseignement et d'apprentissage d'un même objet pris dans des formes institutionnelles distinctes. Il peut s'agir de la transition entre le primaire (où officie un enseignant polyvalent) et le secondaire (enseignant spécialiste d'une discipline) ou bien entre une institution « officielle » (école obligatoire, post-obligatoire, université, etc.) et une institution « non-officielle » mais porteuse d'une intention didactique (club de sport, école de musique, musée, etc.). Enfin, un autre point d'intérêt concerne l'investigation des pratiques relatives à un même objet pris dans des cultures scolaires et des traditions curriculaires différentes (typiquement, entre des contextes scolaires nationaux différents, comme les cantons de Suisse romande et la France).

Le croisement des études qui font varier les différents paramètres du système éducatif (objet de savoir, institution d'apprentissage/enseignement) doit permettre d'établir une cartographie fine des spécificités/généricités et d'éclairer les questions fondamentales de la didactique comparée. Dans ce cadre, le travail de théorisation a largement commencé et « certains concepts jouent le rôle de candidats au statut de dimensions fondatrices de l'espace didactique » (Mercier et al., 2002, p. 11). En effet, certains outils à fort potentiel de généricité, et donc candidats pour l'exercice comparatiste, ont déjà été sélectionnés, débattus, soumis à la communauté de didacticiens : rapport aux objets, triplet de genèses, structures fondamentales de l'action professorale. Nous reviendrons sur ceux qui nous semblent les plus pertinents dans la suite (cf. 1.3.4). Soulignons ici que le comparatisme en didactique ne procède pas par comparaison

directe d'un système avec un autre, c'est-à-dire par énumération des similarités et des différences par simple juxtaposition. Le comparatisme vise l'identification des phénomènes génériques, des « manières de faire » récurrentes, phénomènes non visibles par comparaison directe, mais qui peuvent être construits à l'aide des outils à fort potentiel de généralité. Ces outils jouent le rôle de tiers comparant, et donc de révélateurs de phénomènes impossibles à repérer au sein d'une didactique disciplinaire isolée.

Enfin, il existe une solidarité foncière entre les dimensions génériques et spécifiques et seul l'exercice de cette solidarité permet de construire l'intelligibilité des pratiques d'enseignement et d'apprentissage (Sensevy & Ligozat, 2017 ; Amade-Escot & Venturini, 2009) :

Sans description générique, il manque aux descriptions spécifiques une catégorisation susceptible de faire identifier les fonctions générales que les faits décrits permettent de remplir et les finalités qu'on peut leur attribuer ; sans description spécifique, les descriptions génériques s'épuisent rapidement parce qu'elles sont impropres à rendre compte de certaines relations de type causal qui « déterminent » en partie l'action conjointe. (Sensevy & Ligozat, 2017, p. 175)

Comparatisme et étude de la transposition : une relation privilégiée

Nous avons défendu plus haut l'idée que le point de vue comparatiste sur l'analyse didactique des pratiques de classe permet de produire des résultats complémentaires aux travaux de didactique des disciplines. Quelle est la nature de ces résultats de recherche ?

Une partie de ceux-ci concernent l'étude de la transposition. Selon Chevallard, une certaine « illusion de la transparence du savoir » voire de « dénégation de la transposition didactique » tend à naturaliser les façons traditionnelles d'enseigner les savoirs, comme si elles découlaient naturellement et immuablement de la nature même de ces savoirs. Chevallard (1986) a tôt averti sur les dangers de ce point de vue :

« À ne pas " travailler " la transposition didactique, à accepter, sans inventaire préalable, l'héritage qu'elle nous transmet, nous nous condamnons ainsi à reproduire indéfiniment un motif qui semble fixé une fois pour toutes » (p. 10-11)

Une façon de reproblématiser les savoirs scolaires est de comparer les effets transpositifs entre des contextes contrastés dans lesquels les objets ont subi des formes de déterminations différentes : c'est exactement ce que propose la didactique comparée à travers le deuxième axe de travail. Dans ce deuxième axe, la didactique comparée utilise les mises en relation entre les pratiques didactiques issues de plusieurs formes institutionnelles pour identifier des schémas d'action, des habitudes, des manières d'enseigner qui pourraient passer inaperçus ou être tenus pour naturels si l'on avait considéré qu'une seule forme institutionnelle. Cette approche permet de révéler des dimensions que l'on ne remarquerait pas sans la comparaison. Lorsque le savoir savant constitue une référence commune pour les différents contextes choisis, les conditions sont optimales pour questionner « le travail des institutions sur les savoirs et les pratiques qui les font vivre » (Ligozat, 2008, p. 20). C'est le cas de ce travail de thèse qui explore comment

un même objet de savoir (les propriétés de la matière) est configuré dans des pratiques de classe incluses dans des institutions différentes (primaire, secondaire, Suisse romande, France)

En conclusion, le comparatisme en didactique est une entrée privilégiée pour explorer les processus de transposition (Schubauer-Leoni & Leutenegger, 2005). En contraste avec le mouvement esquissé par le sous-titre de l'ouvrage de Chevallard (1985/1991) « Du savoir savant au savoir enseigné », c'est donc à l'aide d'une logique ascendante que la didactique comparée se propose d'étudier les phénomènes transpositifs. L'étude des pratiques ordinaires constitue le fondement de cette étude.

1.3 L'étude de l'action conjointe de l'enseignant et des élèves en didactique

Nous exposons à présent deux sources d'inspiration que sont l'interactionnisme social et le pragmatisme qui ont permis aux didacticiens comparatistes de renouveler le sens de certains concepts fondateurs de la didactique, et notamment le contrat et le milieu.

1.3.1 Apports de l'interactionnisme social : Un agir didactique conjoint

Apports de l'interactionnisme social : Un agir conjoint en didactique

Nous envisageons l'étude des pratiques d'enseignement et d'apprentissage à travers une approche dérivée de l'interactionnisme social. Celle-ci démarre du présupposé que l'action d'un sujet n'est jamais exécutée de façon isolée mais qu'elle est sous-tendue par un processus d'interprétation du sens des actions d'autrui : l'action repose donc sur le déchiffrement des actions verbales et corporelles que l'autre accomplit dans un certain milieu, par reconnaissance de schémas intersubjectifs, c'est-à-dire sur la sémiose d'autrui (Sensevy, 2013). Notons d'ailleurs que le contrat didactique, défini comme un horizon d'attentes réciproque, est compatible avec ce point de vue puisque « le système d'attente qui lie les élèves au professeur [les] engage à interpréter les paroles professorales à l'aune de ce qu'ils devront (en) faire » (Sensevy & Quilio, 2002, p. 49). Par conséquent :

« Pour Mead, la vie d'un groupe humain n'est pas une addition ou un assemblage d'actes individuels séparés, chacun avec sa propre ligne indépendante de formation. Au contraire, elle consiste en une activité conjointe, au sein de laquelle l'acte individuel se forme comme étant dirigé pour s'adapter au cadre des actes des autres » (Blumer cité par Sensevy, 2013, p. 56 ; Traduction de Sensevy)

Tout type d'action sociale (faire un discours, aller chez le médecin, danser, se battre, etc.) est donc fondamentalement conjoint. Cette assertion s'est diffusée en didactique à partir des années 2000 (cf. le numéro 466 du Bulletin de Psychologie, 2003, « Interaction, acquisition de connaissances et développement »), avec l'idée que le caractère conjoint de l'action s'avère particulièrement pertinent pour décrire les pratiques d'enseignement et d'apprentissage. Au sein de celles-ci, on ne peut pas comprendre l'action de l'élève sans prendre en compte l'action de l'enseignant (et inversement) :

« L'action de l'élève est contrainte (jusqu'à un certain point) par celle du professeur ; en retour, l'action du professeur est orientée par celle de l'élève, les attentes des deux parties étant sans cesse renégociées dans le contrat didactique » (Ligozat & Leutenegger, 2008, p. 327)

Comme nous l'avons souligné en introduction, une pratique didactique n'est intelligible qu'à la condition d'intégrer simultanément dans sa description les trois instances d'un système didactique insécable (l'élève, l'enseignant, le savoir). Or, bien que le champ des recherches en didactique ait promu le système didactique comme le découpage fondateur du domaine de réalité auquel il s'attelle, il a accordé « une attention quasi-exclusive soit à l'apprentissage des élèves indépendamment du travail professoral soit du savoir à enseigner, étudié pour lui-même » (Sensevy & Ligozat, 2017, p. 174). La notion d'action conjointe permet donc de donner un cadre théorique à l'idée fondatrice de triangle didactique, en fournissant un angle d'attaque pour en saisir le caractère systémique. Évidemment, la nécessité de penser ensemble l'action du professeur et des élèves requiert des outils qui reconnaissent l'indissociabilité des instances du système didactique : nous développons leur description ci-dessous (cf. 1.3.4).

Dissymétrie des postures & interdépendance des lignes d'action

L'action de l'enseignant et des élèves est certes conjointe mais elle s'opère sous couvert de l'institution scolaire dans laquelle chacun des protagonistes occupe des positions institutionnelles distinctes. Chevallard distingue deux registres épistémologiques qui distinguent la position de l'enseignant de celle des élèves et qui reflètent deux rapports différents aux objets de savoir et à leur défilement sur l'axe du temps.

L'enseignant agit au sein d'un registre programmatique : d'une part, il possède des connaissances dont les élèves sont dépourvus et c'est d'ailleurs « parce que le maître sait quelque chose que l'élève ne sait pas encore qu'il peut fonctionner en tant que maître » (Schubauer-Leoni, 1988, p. 72). D'autre part, c'est l'enseignant qui planifie l'enchaînement et l'articulation des milieux et des tâches que les élèves ont à traiter et qui prévoit la responsabilité des élèves par rapport à ces tâches. L'enseignant est donc doublement en avance sur ce que savent les élèves, « car non seulement il sait l'issue de la question ou du problème que l'élève tente de résoudre (...) mais encore il sait ce qui viendra ensuite dans la planification des objets d'enseignement puisqu'il en est l'instigateur » (Ligozat, en préparation, p. 17).

L'élève, pour sa part, agit au sein d'un registre reconstitutif : devant une tâche, il construit des rapports aux objets de la situation en tentant de trouver des continuités avec ses expériences précédentes. Il ne peut pas être sûr à l'avance de la pertinence de l'action qu'il entreprend par rapport au projet de l'enseignant et est contraint de s'engager, sur la base de certains indices qu'il estime pertinents, sur une voie incertaine.

Ainsi, comme le soulignent Ligozat & Leutenegger (2008) :

« Si le professeur tente d'enseigner un objet de savoir bien précis (pour lui tout au moins), l'élève, lui, cherche à apprendre « quelque chose » ; cet enjeu ne peut être déclaré à l'avance et ne peut faire l'objet d'un accord éventuel qu'après-coup. De ce point de vue, l'enjeu de savoir ne peut être regardé

comme le but commun des participants à la relation didactique, au sens où ce but serait également partagé par tous, au même moment et serait le moteur d'actions convergentes » (p. 326)

Puisque les élèves et l'enseignant n'occupent pas des positions symétriques par rapport au savoir en jeu, action conjointe n'est donc synonyme ni avec superposition des lignes d'action ni avec partage de buts communs : dans la relation didactique conjointe, il s'agit surtout d'une interdépendance des actions (Schubauer-Leoni et al., 2007 ; Ligozat & Leutenegger, en préparation).

1.3.2 Une approche pragmatiste – des rapports aux objets et des significations

Nous analysons d'abord de quelle façon la notion de rapport aux objets amenée par Chevallard dans le cadre de la TAD est compatible avec une approche pragmatiste qui se centre sur la construction de significations.

Objet, rapport personnel aux objets, rapport institutionnel aux objets

Dans la théorie anthropologique du didactique, nous avons souligné que Chevallard critique la vision substantialiste du savoir et introduit à la place une définition praxéologique du savoir, qui le lie de façon indissociable avec une (ou des) pratique(s) sociales et un (ou des) domaine(s) de réalité au sein d'une (ou plusieurs) institution(s) donnée(s).

Mais Chevallard souligne également une autre conséquence néfaste de cette vision. Si un savoir se transmettait « à la manière d'un bien matériel », il n'existerait que deux états possibles pour l'élève par rapport à ce savoir : le savoir a été transmis et l'élève sait *ou bien* le savoir n'a pas été transmis et l'élève ne sait pas. Chevallard reproche à cette conception dichotomique son incapacité à représenter l'étendue des rapports possibles que l'élève entretient avec les objets relatifs au savoir. Autrement dit, il existe une pluralité dans les manières que l'élève a de connaître un objet et il s'agit de trouver des mots pour pouvoir en parler. Afin de dépasser cet « enfermement dans la représentation dualiste de l'ignorance et du savoir », il propose donc de recourir à plusieurs notions : la notion d'objet, la notion de rapport personnel à un objet, la notion de rapport institutionnel à un objet.

Selon Chevallard, « est objet toute entité, matérielle ou immatérielle, qui existe pour au moins un individu. (...) En particulier, toute œuvre, c'est-à-dire tout produit intentionnel de l'activité humaine, est un objet » (2003, p. 81). La notion d'objet est prise dans une très large acception, puisque, dans ce sens par exemple, « les bulles de cette expérience » mais aussi « l'idée générale de bulle », « le thermomètre », « l'ébullition », « l'énergie thermique » sont tous des objets.

Le rapport personnel d'un individu à un objet est défini par « le système de toutes les interactions que l'individu peut avoir avec cet objet – que le sujet le manipule, l'utilise, en parle, en rêve, etc. » (Chevallard, 2003, p. 81). Le rapport d'un individu à un objet précise la manière dont il connaît cet objet : connaître un objet signifie donc que l'individu a un certain rapport à cet objet, quelle que soit la nature de ce rapport. Chevallard déclare alors que :

« l'extension de sens donnée au verbe connaître dans les développements précédents se justifie par le fait qu'il n'est pas une manière de connaître un objet, mais une pluralité indéfinie » (Chevallard, 2003, p. 84).

On voit bien ici comment cette définition large de « connaître » surmonte les écueils de la binarité savoir/non-savoir dénoncés ci-dessus. L'ensemble constitué des objets connus d'un individu et des rapports personnels de cet individu à ces objets dépeint l'univers cognitif de l'individu.

Enfin, en définissant une institution comme une structure sociale dans laquelle sont mises en jeu des manières de faire et de penser propres par rapport à certains objets (telle que l'école, la classe, la famille, les amis, le club de sport, etc.), il est possible de définir un rapport institutionnel à un objet, relativement à un individu qui occupe une position particulière dans cette institution : il s'agit du rapport à cet objet qui devrait être, idéalement, celui des sujets de l'institution occupant cette position. Par conséquent, lorsqu'un individu entre dans une institution où vit un objet donné, son rapport personnel à cet objet se crée ou évolue dans une tentative de se mettre en conformité avec ce rapport idéal.

Selon Chevallard, un individu est, dès sa naissance, assujetti (« c'est-à-dire à la fois soumis à et soutenu par ») à un grand nombre d'institutions, dans lesquelles il occupe une position particulière. Lorsqu'un objet vit au sein de plusieurs institutions, celles-ci prescrivent chacune un rapport idéal à cet objet, en termes de pratiques sociales déterminées et de finalités spécifiques. Le rapport personnel d'un individu à un objet se transforme au gré de ses assujettissements au sein de toutes les institutions dans lesquelles cet objet possède une existence. Puisque certains rapports institutionnels sont susceptibles de rentrer en concurrence, on ne peut pas dire d'un individu qu'il connaît ou ne connaît pas un objet, mais seulement qu'il connaît (ou non) cet objet dans les termes d'une institution particulière. La personne est « un émergent de ses assujettissements passés et présents, auxquels on ne saurait donc jamais la réduire » (Chevallard, 2003, p. 84).

Ces considérations amènent des bouleversements conséquents dans certaines définitions liées aux pratiques d'enseignement et d'apprentissage. L'intention d'enseigner un savoir devient l'intention de modifier le rapport des élèves à propos de certains objets. Lors du processus d'apprentissage, le rapport d'un élève à un objet se met à exister (s'il n'existait pas déjà) ou se transforme (s'il existait déjà). Quant à la didactique (en tant que champ de recherche), elle s'interroge sur « les ensembles de conditions sous lesquelles un individu concret peut établir le rapport attendu sous les contraintes imposées » (Chevallard, 1988, p. 3).

Compatibilité de la notion de « rapport aux objets » avec une approche pragmatiste de la construction des significations en milieu scolaire

Nous soutenons l'idée que la notion de « rapport aux objets » présente des points communs avec l'approche pragmatiste de la construction des significations en situation scolaire, telle que développée par les travaux suédois portés par Wickman et ses collaborateurs (Hamza & Wickman, 2009 ; Wickman, 2004). Ces travaux ont pour objectif l'analyse de l'« épistémologie

pratique » construite par les élèves et se fondent sur les travaux relatifs aux jeux de langage menés par Wittgenstein et sur la notion de continuité de l'expérience amenée par Dewey :

In the Swedish pragmatist approach to science learning, the PEA [practical epistemology analysis] framework was developed as an analytical tool for characterizing the meaning-making process in science-classroom discourse. (...) Wickman (2004) suggests that as the curriculum unfolds in the teacher's and the students' actions and discourse, a practical epistemology is shaped. Hence, from the students' point of view, learning content is dependent on the epistemologies developed in the classroom, as a set of epistemic and social norms that guide the selection of relevant actions to achieve a purpose. (...) We do not aim at describing such rules and power relations per se but we seek for the connection between how classroom participants produce meaning and what meaning is produced in a specific practice. The model of Practical Epistemology Analysis developed by P.-O. Wickman and collaborators relies upon L. Wittgenstein's notion of language-game (Wittgenstein 1967) and J. Dewey's theory of continuity in experience transformation (Dewey 1938/1997). For the former, meaning is a given in the socially shared rules supported by a language proper to a context. Learning is then mastering a language-game, i.e. the grammar of actions featuring a practice. For the latter, experience is continually transformed by the transactions taking place between an individual and his environment. Subjects build continuity between past and present experiences so that experience earned in a given situation becomes an instrument for understanding and dealing with the situations which follow (Dewey 1938/1997, p44) (Ligozat, Wickman & Hamza, 2011, p. 2472-2473)

L'analyse de la compatibilité entre les traditions de recherche francophones basées sur la théorie anthropologique du didactique et les traditions suédophones d'orientation pragmatiste a déjà été menée ailleurs (Ligozat, Wickman & Hamza, 2011 ; Ligozat, 2014 ; Ligozat, Lundqvist & Amade-Escot, 2018). Pour notre part, nous considérons que :

- La notion de signification (« meaning-making » en anglais), issue de l'approche pragmatiste et celle de rapport aux objets, issue de la théorie anthropologique du didactique présentent des similarités importantes : elles visent toutes deux à se placer à la hauteur de la lecture de la situation par l'individu. Autrement dit, elles participent de la même volonté de reconstruire les relations entre les objets du point de vue des sujets. D'autre part, elles sont toutes deux inférées à partir des actions verbales ou corporelles des participants en situation d'enseignement/d'apprentissage. Ces deux notions ne se superposent pas pour autant : le « rapport personnel à un objet » résulte de l'ensemble des interactions qu'un individu a eu l'occasion de créer avec un objet donné dans les différentes institutions entre lesquelles il navigue et dans lesquelles cet objet existe ; plus locale, la « signification » constitue une des facettes du rapport à un objet qui est rendue publique dans un contexte donné.
- L'approche pragmatiste souligne également que les significations se construisent sur fond de règles socialement partagées et sont soutenues par un jeu de langage propre à

un contexte, et donc à une institution. Ce point de vue partage des similarités avec la définition praxéologique du savoir, qui relie savoir, pratiques sociales et institutions.

En résumé, dans notre recherche, nous envisageons l'étude des pratiques d'enseignement et d'apprentissage à travers une approche pragmatiste : dans ce cadre, la focale d'étude se déplace sur les rapports aux objets/significations que les participants construisent au sein des situations dans lesquelles ils sont placés et sur les conditions d'évolution de ces rapports aux objets/significations. En effet, la signification ou le rapport à un objet se révèlent être des candidats intéressants pour approcher le contrat didactique :

« Le sens de la situation (et donc ce qui est à faire dans le milieu) est déterminé par le contrat didactique. Les rapports aux objets (...) témoignent du sens de la situation du point de vue des acteurs (et donc des enjeux du contrat) » (Ligozat, 2016, p. 305)

Autrement dit, les significations ou les rapports à un objet se font les reflets de l'interprétation de la situation par l'enseignant ou les élèves et participent, dans ce cadre, à rendre visible le contrat didactique. En accord avec l'idée de continuité de l'expérience, il est alors intéressant de mettre en relation les rapports aux objets construits face à une situation précise et les déjà-là constitués des habitudes d'action, des usages, des références disponibles, par rapport aux objets du milieu.

1.3.3 Relecture des notions broussaldiennes de contrat et de milieu à la lumière des approches socio-interactionniste et pragmatiste

Nous montrons à présent comment le sens des concepts de contrat et de milieu a évolué au cours du temps dans le cadre de l'analyse didactique de l'action conjointe de l'enseignant et des élèves.

Le contrat : continuités entre la situation et l'ensemble des usages habituels spécifiques des objets

Dans le paragraphe 1.1.3, nous avons défini le contrat didactique comme constituant le cadre interprétatif évolutif qui permet le décodage des situations auxquelles les élèves sont confrontés et la négociation du sens des objets du milieu par l'enseignant et les élèves.

Selon la TSDM de Brousseau, « les mécanismes générateurs du contrat » par les élèves (Sarrazy, 1995, p. 93) se fondent sur la reconnaissance des habitudes spécifiques du maître : l'interprétation des élèves sur ce qu'il y a à faire s'appuie sur la recherche d'une continuité entre les éléments de la situation et les usages habituels développés en classe à propos de ces éléments. Bien que ce mécanisme de recherche de continuités apparaisse pertinent, sa limitation aux usages spécifiques internes à la classe pose des difficultés dans d'autres disciplines que les mathématiques. En mathématiques, au sein d'une thématique donnée, le système des tâches présente habituellement peu de variation d'une tâche à l'autre (parfois, seulement les valeurs numériques) ; d'autre part, les objets qu'on y rencontre ont une existence très locale du point de vue de l'élève, presque confinée à la salle de classe (en famille, avec les copains, on n'aborde pas l'objet « $\sqrt{2}$ » ou « triangle isocèle »). Ces deux caractéristiques

illustrent la raison pour laquelle les ressources à disposition des élèves pour interpréter la situation sont effectivement surtout à rechercher dans les habitudes spécifiques internes à la classe. Mais dans d'autres disciplines, les objets vivent à l'interface de plusieurs institutions : en sciences physiques, les objets, tant théoriques que physiques (le poids, les forces, l'eau, les circuits électriques) ont une existence en dehors de la classe où ils sont pris quotidiennement dans d'autres usages, d'autres pratiques : au final, d'autres règles, normes se sont sédimentées à leurs propos dans les diverses institutions où ils apparaissent ; d'autre part, les systèmes de tâches pour l'enseignement des sciences physiques ne possèdent pas cet aspect répétitif propre aux problèmes mathématiques et peuvent présenter des discontinuités nettes de l'une à l'autre. Comme le souligne Ligozat (en préparation) :

« Les rapports au monde construits par les élèves dans la biographie de leurs différents assujettissements institutionnels (école, famille, cours de récréation, leçons dans les différentes disciplines scolaires) entrent dans la construction de significations à propos des composantes de la situation dans laquelle ils ont placés. (...) Ainsi, lorsque l'élève agit sur un objet du milieu (...), le rapport à cet objet (...) prend forme dans ce qui est interprété du contrat didactique hic et nunc, mais également dans la continuité des rapports à cet objet établis dans d'autres situations (ou pour le dire à la manière de Chevallard : dans d'autres formes d'assujettissements antérieurs ou collatéraux) » (p. 16)

Il est donc possible que les recherches de continuité dont témoignent les élèves prennent en compte l'ensemble des usages habituels des objets de la situation, que ceux-ci soient internes ou externes à l'institution scolaire. Mais rares sont les études qui s'interrogent sur « comment et par quels indices les élèves construisent du sens à propos à la fois du savoir et de la situation de questionnement » (Schubauer-Leoni, 1988, p. 75). Ces études auraient cependant toute leur place dans une approche pragmatiste de l'étude des rapports aux objets construits par les élèves et de leurs évolutions au cours du temps.

Le milieu : abandon de la fonction antagoniste

Dans le paragraphe 1.1.3, nous avons défini le milieu comme étant constitué des objets (physiques, verbaux, symboliques) avec lesquels enseignant et élèves interagissent.

Selon la TSDM de Brousseau, le milieu constitue le système antagoniste de l'élève en lui fournissant les rétroactions qui autorisent la validation ou l'invalidation de ses stratégies d'action et qui permettent, in fine, l'émergence de nouvelles connaissances. Cet aspect a été remis en question dans de nombreuses études didactiques, particulièrement dans des disciplines qui ne relèvent pas des mathématiques (Orange, 2007 ; Amade-Escot & Venturini, 2009 ; Thevenaz-Christen, 2002). Le potentiel de rétroaction du milieu n'est pas évident, y compris au sein des sciences expérimentales : « le milieu matériel convoqué ne peut fournir seul les rétroactions permettant à l'élève d'avancer vers le savoir en jeu » (Amade-Escot & Venturini, 2009, p. 27).

Mais l'argumentaire en défaveur de la fonction antagoniste du milieu s'appuie surtout sur l'idée que celui-ci évolue au fil des échanges didactiques dans des directions qui ne peuvent pas être complètement anticipées. À cela, deux raisons principales :

- D'une part, l'action des élèves est déterminée par un processus d'interprétation de la situation (lié au contrat didactique). Rien n'assure a priori que cette interprétation permette au milieu de jouer sa fonction antagoniste : en effet, chaque élève, dans sa tentative d'identifier ce qu'il y a à faire, identifie *un* contrat et se donne *un* milieu pour engager l'action (pour la notion de milieux différentiels, voir Ligozat & Leutenegger, 2008). Les objets qu'il se désigne pour résoudre la tâche ou le problème posé ne sont pas forcément les objets adéquats pour que la rencontre avec le savoir ait lieu : par conséquent, le milieu de l'élève ne se superpose pas nécessairement au potentiel milieu antagoniste prévu en amont par l'ingénieur didacticien ou l'enseignant. Amade-Escot & Venturini (2009) montrent par exemple, que, dans une tâche en sciences physiques, « les élèves pointent des phénomènes apparaissant dans le milieu, liés à des objets considérés a priori comme extérieurs par l'enseignant » (p. 18).
- D'autre part, le milieu n'est pas statique mais en perpétuelle évolution. S'il est défini comme l'ensemble des objets que les élèves ou l'enseignant manipulent, il est évident qu'il s'agit « en vérité [d']un construit permanent » (Chevallard, 1992, p. 95). Et puisque l'action conjointe postule que le milieu résulte en fait d'une co-construction par l'enseignant et les élèves, les significations que les élèves construisent (parfois éloignées des savoirs visés par l'enseignant) sont susceptibles d'être réinjectées sur le devant de la scène à tout moment, en apportant leur lot de contingences dans la nature de problèmes traités dans le collectif :

« Le milieu nécessaire à l'étude des savoirs relève d'un processus de co-construction qui n'est jamais totalement contrôlé ni garanti par le dispositif ou la tâche d'apprentissage. (...) S'il implique bien évidemment des aspects liés à l'épistémologie du professeur et aux conditions matérielles et symboliques structurant les dispositifs proposés aux élèves, au-delà, il est aussi le produit émergent de l'action conjointe professeur-élèves » (Amade-Escot et Venturini, 2009, p. 17)

Au final, l'aspect antagoniste, considéré comme inéluctable et consubstantiel d'un milieu pensé en amont par le didacticien dans la TSDM ne nous semble pas tenable, surtout dans le cas des situations d'enseignement et d'apprentissage des sciences où les objets vivent à la croisée de plusieurs institutions ; il n'est pas exclu pour autant que le milieu offre des ressources et des contraintes productives vis-à-vis de l'action des élèves et de l'enseignant, mais c'est à la charge de l'analyse didactique de montrer a posteriori si certains des rapports aux objets produits par l'enseignant et les élèves témoignent de rétroactions pertinentes du milieu par rapport aux enjeux de savoirs visés par l'enseignant. Là encore, nous faisons l'hypothèse qu'une approche pragmatiste permet de se libérer du « souci déterministe qui hante encore certains travaux d'ingénierie didactique » (Chevallard, 2007, p. 41).

1.3.4 La modélisation de l'action conjointe à l'aide de différents systèmes de descripteurs

L'analyse des pratiques d'enseignement et d'apprentissage a pour objectif premier l'intelligibilité des logiques d'action des participants de la classe. Ces logiques d'action ne se laissent pas saisir directement mais découlent d'une interprétation outillée des phénomènes de classe. Dans la suite, les cadrages théoriques sur lesquels nous nous appuyons pour outiller notre regard sont récapitulés et les différents systèmes de descripteurs qui viennent les rendre effectifs sont introduits.

Le triplet de genèses : mésogenèse, topogenèse, chronogenèse

L'action de l'enseignant et des élèves peut être considérée comme une action conjointe dans le sens où chacun ajuste sa propre ligne d'action en interprétant celle de l'autre. L'enseignant et les élèves agissent au sein d'un milieu, co-construit et en évolution permanente. L'articulation d'un contrat et d'un milieu permet la production de significations nouvelles qui viennent à leur tour enrichir le milieu et qui sont l'objet d'une négociation entre enseignant et élèves afin d'aboutir à de nouveaux éléments de référence partagée, celle-ci étant définie comme l'ensemble des objets sur lesquels s'accordent les acteurs de la classe. À un instant donné, la référence déjà-partagée constitue donc l'ensemble des éléments précédemment institutionnalisés⁴.

Initialement proposés par Chevallard (1985/1991, 1992) puis retravaillés par Schubauer-Leoni & Leutenegger (2002), Sensevy (2007), Schubauer-Leoni et al., (2007), Ligozat & Leutenegger (2008), les concepts de mésogenèse, topogenèse et chronogenèse visent à retracer la dynamique des significations produites par l'enseignant et les élèves qui conduisent à l'établissement d'une référence partagée.

La mésogenèse décrit la genèse du milieu, c'est-à-dire la dynamique des objets introduits par l'enseignant et les élèves qui viennent constituer et enrichir le milieu. Les objets peuvent être matériels, symboliques et conceptuels. Selon Ligozat & Leutenegger (2008) :

« [La mésogenèse] permet de caractériser avant tout le système d'objets et de tâches auquel les élèves ont affaire et de ne pas poser a priori l'existence d'un milieu mathématique (au sens de Brousseau, 1990) qui aurait des caractéristiques a-didactiques (système antagoniste à l'action de l'élève) (...). L'étude de la mésogenèse permet au contraire de « ratisser plus large » en examinant des objets qui, au demeurant, n'ont pas, à première vue, de caractéristiques mathématiques, mais qui, néanmoins ont une fonction dans l'économie de la séance en classe et participent, de fait, à l'aménagement d'un milieu pour enseigner et apprendre » (p. 330)

Le milieu, libéré de son aspect antagoniste, intègre l'ensemble des significations que les participants produisent par rapport aux objets du milieu : la définition du milieu est élargie « à

⁴ Nous distinguons la référence déjà-partagée qui réfère à l'ensemble des éléments précédemment institutionnalisés de la référence partagée qui peut référer aussi bien à ces éléments qu'aux éléments que l'enseignant a prévu d'institutionnaliser dans le futur du déroulement des séances. Le tiret (déjà-partagée) est construit par analogie avec celui présent dans « déjà-là ».

la contingence des objets convoqués et des significations construites par les sujets, au fil de l'action dans la situation » (Ligozat, 2015, p. 19). Par conséquent, le milieu se fait réellement le reflet du sens qu'enseignant et élève donnent à la situation dans laquelle ils sont plongés. C'est sous ces conditions que nous partageons le point de vue selon lequel la mésogenèse est première dans l'étude de l'action conjointe (Ligozat & Leutenegger, 2008 ; Amade-Escot & Venturini, 2009 ; Schubauer –Leoni et al., 2007).

La topogenèse décrit l'évolution du partage des responsabilités entre les participants par rapport aux objets d'un milieu donné. Élèves et enseignant interagissent sur les objets du milieu, les faisant évoluer au fil du temps. Dans ce processus, chaque participant occupe des positions particulières dans l'émergence des significations qui sont sur le devant de la mésogenèse. Leur statut (notamment, la confiance qu'on peut leur accorder) n'est pas équivalent si c'est l'enseignant ou un élève qui les a produites puisque dans la classe, la portée de ce qui est dit dépend en partie de qui le dit.

La chronogenèse décrit la dynamique de l'avancement des objets de savoir au fil du temps didactique. Elle dépend du projet d'enseignement de l'enseignant puisque c'est lui qui décide, en amont, de la chronologie des savoirs mis à l'étude aussi bien à l'échelle d'une unité d'enseignement, d'une leçon ou d'une tâche. Dans la classe, le temps de l'enseignement avance quand le professeur prend appui sur certains objets de la mésogenèse pour faire évoluer son projet d'enseignement.

Ces trois genèses, en tant que descripteurs de l'action conjointe, sont étroitement articulées : « à chaque état de la mésogenèse correspond un état de la topogenèse et de la chronogenèse » (Amade-Escot & Venturini, 2009, p. 29). Pris ensemble et couplés à un point de vue sur les savoirs (notamment, à travers une analyse a priori, cf. 1.4), ils permettent de rendre compte de la dynamique de co-construction des savoirs dans la classe.

Cependant, les trois genèses ne possèdent pas le même statut, au regard de la dissymétrie des postures de l'enseignant et des élèves : puisque c'est l'enseignant qui planifie l'enchaînement et l'articulation des tâches que les élèves ont à traiter, c'est lui qui d'une part, autorise plus ou moins de potentiel d'action aux élèves en leur assignant un rôle et en s'en attribuant un lui-même et d'autre part, qui décide du rythme du déploiement des objets de savoir. In fine, la gestion chronogénétique et la ligne de partage topogénétique sont des processus qui restent majoritairement pilotés par l'enseignant, même si les élèves contribuent à ces dynamiques. Pour ce faire, l'enseignant met en œuvre des gestes spécifiques, qui constituent les techniques mésogénétiques, topogénétiques et chronogénétiques décrites dans le paragraphe suivant. Constatons enfin que c'est cette différence de statut entre enseignant et élèves qui permet de postuler la non-équivalence de la mésogenèse et de la chronogenèse :

« [La chronogenèse] est donc plutôt l'affaire du professeur car si en certaines occasions, on peut observer que des élèves exhibent fort à propos des objets de nature à servir le projet du professeur, celui-ci n'est pas nécessairement prêt à les accueillir. Nous postulons que mésogenèse et chronogenèse ne sont pas superposables. Alors que le concept de mésogenèse comprend l'ensemble des objets et des rapports à ces objets qui s'établissent, la chronogenèse est

plus restrictive aux objets qui sont directement sous la responsabilité du professeur » (Ligozat et Leutenegger, 2008, p.329)

Autrement dit, c'est toujours à l'enseignant que revient le choix de mettre en avant et/ou d'instituer une proposition d'élève, que celle-ci serve ou non son projet d'enseignement : l'élève chronogène est susceptible de contribuer à la chronogénèse mais il n'en est pas maître.

Les techniques mesogénétiques, chronogénétiques et topogénétiques

Au fil des travaux sur la modélisation de l'action conjointe, plusieurs techniques didactiques qui permettent la co-construction des objets ont été mises au jour, à partir de certains résultats issus de l'espace empirique (Ligozat & Leutenegger, 2008 ; Ligozat, 2015) :

- les techniques topogénétiques qui interviennent sur les positions des participants vis-à-vis du savoir : se placer en retrait (lorsque l'enseignant laisse le milieu orienter seul les significations produites par les élèves et que ceux-ci travaillent sans son intervention) ; faire preuve de postulation mimétique (lorsqu'il fait semblant de ne pas savoir davantage que les élèves) ; se mettre en position d'accompagnement (lorsqu'il participe à la reformulation des significations introduites par les élèves) ; utiliser une coalition (lorsqu'il organise la mise en débat des différentes significations émergentes) ; se mettre en surplomb (lorsqu'il statue sur la pertinence ou la non-pertinence des significations de la mésogénèse) ; etc. Par l'utilisation de ces techniques, l'enseignant montre l'espace de responsabilité que les élèves sont autorisés à prendre dans les processus de négociations des significations à l'œuvre dans l'action conjointe ;
- les techniques chronogénétiques qui interviennent sur la création du temps didactique : faire appel à la mémoire didactique de la classe par rappel de contraintes, de situations ou de résultats antérieurs ; anticiper/orienter des actions possibles ; ouvrir une enquête en suspendant son jugement ; instituer des objets/faire des déclarations d'avancée ; repérer des indices de fin d'activité. Par l'utilisation de ces techniques, l'enseignant est susceptible de produire un ralentissement ou une accélération de la chronogénèse ;
- les techniques mésogénétiques qui interviennent sur les configurations d'objets pris en compte dans l'action des participants : désigner des objets matériels, langagiers ou symboliques par ostension physique et /ou verbale (injection de nouvelles consignes, de nouvelles contraintes dans le traitement de la tâche, etc.) ; désigner des règles d'action ; indiquer des traits pertinents ou non pertinents par rapport à une situation donnée ; identifier des contradictions par exemple, entre une signification émergente et d'autres éléments de la référence déjà-partagée. Par l'utilisation de ces techniques, l'enseignant est susceptible de montrer les termes acceptables de la négociation, autrement dit, les modalités « attendues » de sélection et de transformation des significations de la mésogénèse.

Nous voyons que ces techniques sont emboîtées, de la même manière que le triplet de genèses ; par exemple, un geste d'institution d'une signification par l'enseignant participe à la fois d'une technique mésogénétique de négociation du sens de cette signification par rapport à l'objectif de savoir visé, mais aussi d'une technique chronogénétique d'avancée du savoir. Ces techniques

ont été jusqu'ici peu éprouvées dans la littérature didactique, notamment au-delà de l'enseignement des mathématiques. Nous avons pour ambition de tester leur robustesse à travers l'objet de notre thèse : l'étude des pratiques ordinaires d'enseignement en sciences physiques au primaire et au secondaire.

Les structures fondamentales de l'action professorale

À plus large échelle, les modes d'intervention spécifiques de l'enseignant dans le milieu peuvent être décrits par un système de formes fondamentales d'organisation de la pratique qui sont postulées comme génériques (Sensevy, Mercier & Schubauer-Leoni, 2000) : définir, dévoluer, gérer l'incertitude, instituer.

Définir regroupe toutes les actions du professeur qui consistent « à poser un certain nombre d'objets et à établir le cadre d'une situation » (Sensevy et al., 2000, p. 268). L'action de définir trouve son complément dans l'action d'instituer :

« Nous proposons (...) de concevoir l'institutionnalisation, comme une dimension fondamentale d'un travail de production d'institution : le professeur et les élèves s'instituent comme collectif de pensée comptable de leur production de savoir et ils s'autorisent à évaluer cette production. Ils identifient des manières de faire, que l'institution qu'ils forment reconnaît comme légitimes : ce faisant, ils produisent une institution, fondée à valider les manières de faire, dont les élèves et le professeur sont ensemble les sujets. » (Sensevy et al., 2000, p. 272).

C'est par des formes d'institutionnalisation que l'enseignant indique aux élèves que, d'une part, les connaissances construites sont désormais tenues pour référence dans la suite des événements et que d'autre part, elles existent déjà dans la culture extérieure à la classe : autrement dit, l'action d'institutionnaliser formalise ce qu'il y a à retenir de ce qui a été fait et légitime certaines manières de penser et de faire (c'est dans ce sens qu'elle recrée de l'institution). Nous faisons le choix d'utiliser le terme « institutionnaliser » plutôt qu'« instituer » lorsqu'il s'agit d'une action locale de l'enseignant : dans le sens où les « institutionnalisations » apparaissent comme situées, elles participent au processus global d'« institution » qui, lui, accompagne l'ensemble des pratiques didactiques.

La dévolution représente l'ensemble du processus par lequel l'enseignant accroit la responsabilité des élèves dans une situation : il fait en sorte de montrer qu'il se dessaisit du problème pour que les élèves puissent s'engager en première main dans l'activité proposée.

Lorsque le processus de dévolution est entamé, le travail de l'enseignant consiste à gérer l'incertitude quant aux significations nouvelles qui apparaissent dans le milieu :

« lorsque les élèves sont entrés dans un certain type d'activité, lorsqu'ils jouent le jeu proposé par le professeur, celui-ci régule les rapports, « fruits » de leur travail, que les élèves sont en train d'établir à la situation ; (...) ce processus de construction correspond en fait à l'aménagement progressif d'un milieu (...) dont certaines des dimensions ont été fixées aux premiers instants de la leçon. L'aménagement coopératif d'un milieu suppose donc des réaménagements constants, qui vont le plus souvent en direction d'une

réduction de l'incertitude de l'action demandée. (...) » (Sensevy et al., 2000, p. 270-272)

Le travail d'aménagement du milieu, que l'enseignant dirige afin d'amener les élèves vers le savoir visé par l'activité, procède d'un travail de réorganisation des rapports aux objets du milieu exprimés par les élèves : par exemple, sélectionner certains rapports aux objets, les orienter, les modifier, pointer des incohérences, des contradictions, des corroborations ou les écarter etc. Ce travail d'aménagement du milieu correspond aux techniques mésogénétiques répertoriées ci-dessus.

Il est important de noter que les structures fondamentales de l'action professorale ne sont pas spécifiques d'un (ou plusieurs) moment(s) particulier(s) d'une séance (par exemple, définir au début d'une activité et institutionnaliser à la fin). Elles peuvent se retrouver à plusieurs échelles temporelles et coexister au sein d'une même action (notamment, un même tour de parole) :

« [Les structures fondamentales de l'action professorale] coexistent à différents niveaux – et selon un grain plus ou moins fin de l'observation – de réalités des processus didactiques, allant des micro institutionnalisations, qui font avancer le temps didactique de manière presque imperceptible dans une séance, aux macros systèmes de définitions qui opèrent par des changements de milieux pour passer d'une situation à une autre, par exemple » (Ligozat & Leutenegger, 2008, p. 328)

Les structures fondamentales de l'action professorale constituent donc des processus qui accompagnent, avec plus ou moins d'intensité, l'ensemble du travail didactique.

1.4 L'analyse a priori

Nous postulons qu'il est indispensable de coupler les catégories issues de la modélisation de l'action conjointe avec des outils liés à la spécificité des savoirs en jeu afin de rendre intelligible les logiques d'action des élèves et de l'enseignant. Nous faisons l'hypothèse que l'analyse a priori constitue un candidat intéressant dans cette perspective (Assude & Mercier, 2007 ; Schubauer-Leoni, 2002 ; Ligozat, 2009 ; Ligozat, Monge & Marty, en préparation). L'analyse a priori contribue à la modélisation des savoirs et des situations des lesquels ils sont mis en jeu en retraçant les potentialités et les limites d'un milieu donné du point de vue des participants, en fonction d'un contrat postulé.

Le modèle d'analyse a priori des tâches prescrites détaillé par Schubauer-Leoni (2002), et repris par Ligozat (2009) repose sur trois entrées :

- Analyse des possibles réponses expertes du point de vue d'un sujet générique qui se positionne par rapport à une institution de référence :
 - Quelles sont les techniques/actions possibles/nécessaires pour résoudre le problème du point de vue expert ?
 - À quelles pratiques sociales/configurations disciplinaires les savoirs nécessaires pour résoudre le problème correspondent-ils ?

- Analyse des actions et opérations de pensée possibles du point de vue des élèves, à un degré donné, dans un système scolaire donné :
 - Quelles sont les techniques/actions possibles/nécessaires qu'un élève peut mettre en œuvre ? Quels sont les implicites qu'il doit décoder ? Sur quelles ressources peut-il s'appuyer ? Quels obstacles sont possibles ? Comment peut-il contrôler sa réponse ?
- Analyse des actions possibles de l'enseignant sur celles des élèves, à un degré donné, dans un système scolaire donné :
 - Qu'est-ce que l'élève ne peut pas faire seul, que l'enseignant devra montrer, expliciter...etc. ? Quelles sont les difficultés que l'enseignant devra anticiper ?

Dans le champ des recherches en didactique, les fonctions de l'analyse a priori sont multiples. Dans le cas de l'analyse des pratiques ordinaires :

- en préparant l'identification et le choix des événements significatifs, elle sert une fonction méthodologique : « au moment du dépouillement des données et des analyses, [l'analyse a priori permet] de se munir des critères de choix de certaines observables à transcrire et à analyser finement » (Ligozat, 2009, p. 234)
- elle sert une fonction épistémologique de compréhension/explication des comportements des sujets observés en classe. En la croisant avec les catégories issues de la modélisation de l'action conjointe, elle permet de saisir les buts poursuivis par les sujets, et donc comprendre le sens qu'ils attribuent aux situations qu'ils rencontrent. L'analyse a priori est donc un outil privilégié pour accéder au contrat didactique.

Notons enfin que, puisque le milieu est en perpétuelle évolution, l'analyse a priori se renouvelle potentiellement à chaque fois que celui-ci s'enrichit de nouvelles significations. Ligozat (2009) en a montré un exemple, en détaillant différents feuillets d'analyse a priori qui intègrent certains changements majeurs dans le milieu au cours d'une leçon sur l'agrandissement proportionnel des distances. Certains choix de l'enseignant, notamment en termes de formulation de la consigne ouvrent ou ferment des possibles dans l'action des élèves. Dans notre travail, il s'agit donc de choisir un milieu à partir duquel procéder à l'analyse a priori qui soit suffisamment révélateur des possibles de l'action des élèves et de l'enseignant : nous le dénommons « milieu primitif » et le définissons comme l'ensemble des objets initiaux et des conditions initiales organisé par l'enseignant pour engager les élèves dans une tâche, et à partir duquel la mésogenèse peut se développer.

1.5 Les niveaux de détermination de l'action professorale

Comme le souligne Sensevy (2007, p. 32), « une partie importante du comportement [des acteurs de la classe] ne saurait être attribuée aux seuls déterminants internes de la classe ». L'intelligibilité des pratiques enseignantes nécessite de recourir à d'autres niveaux de descriptions que nous détaillons ci-dessous.

Afin de relier les phénomènes observés en classe aux autres composantes qui interviennent dans la transposition institutionnelle des savoirs, nous prenons appui sur la notion d'épistémologie pratique introduite par Brousseau (1986) puis retravaillée par Sensevy (2007), Ligozat (2008 ; 2010) ou Marlot & Toullec-Théry (2014).

Selon Sensevy (2007) :

« lorsqu'un professeur organise l'enseignement dans sa classe, il le fait notamment en fonction d'un certain nombre d'idées, plus ou moins explicites, qu'il entretient à propos du savoir lui-même, de la nature foncière de l'apprentissage, de la signification de l'enseignement » (p. 33)

L'ensemble de ces idées forme l'épistémologie pratique de l'enseignant, définie comme « une théorie implicite de la connaissance (des savoirs enseignés), de son sens, de son usage, des relations que telle connaissance entretient avec telle autre » (Sensevy, 2007, p. 37), charriant également « une conception de ce qu'est l'apprentissage, ce que peuvent être les difficultés d'apprentissage, de ce que peuvent signifier les différences entre élèves, etc » (Sensevy, 2007, p. 37).

Ne se limitant pas aux savoirs acquis en formation initiale, les savoirs qui constituent l'épistémologie pratique de l'enseignant sont construits tout au long de son activité professionnelle. Si nous continuons sur notre lancée d'inspiration pragmatiste, nous considérons que le rapport personnel à un objet (par exemple l'objet « changement d'état » ou bien « difficultés des élèves par rapport aux changements d'état ») émerge en tant que résultante d'une pluralité de rapports institutionnels. Le rapport personnel à un objet se construit au gré des multiples institutions dans lesquelles cet objet a une existence et que l'enseignant est amené à côtoyer au cours de sa carrière (école, lycée, université, ESPE, groupes de formations continues, etc.). Nous en concluons que la pluralité des rapports aux objets propres à la diffusion des savoirs d'une discipline que l'enseignant construit au fil du temps façonne et détermine son épistémologie pratique. Dans notre travail, nous considérerons que l'épistémologie pratique intègre à la fois ce qui, dans l'action de l'enseignant, est en filiation avec les textes prescriptifs dont il dépend et qui constitue l'institution principale auquel il est assujéti mais aussi ce qui ne semble ne pas l'être et qui fait écho à d'autres institutions qu'il côtoie ou qu'il a côtoyé et dont l'origine est parfois difficile à identifier.

L'épistémologie pratique constitue une notion centrale car elle permet de mettre en résonance la logique d'action de l'enseignant appréhendable à l'aide des catégories précédemment établies avec des déterminants plus généraux, notamment ceux relatifs aux pré-construits institutionnels et culturels qui influent sur sa pratique. Ces déterminants agissent comme des principes structurant la pratique, ce sont des organisateurs de l'action de l'enseignant.

Chevallard (2002) propose une hiérarchie de niveaux de détermination didactique, qui se déploie à différentes échelles, représentée sur la figure ci-dessus (cf. Figure 2).

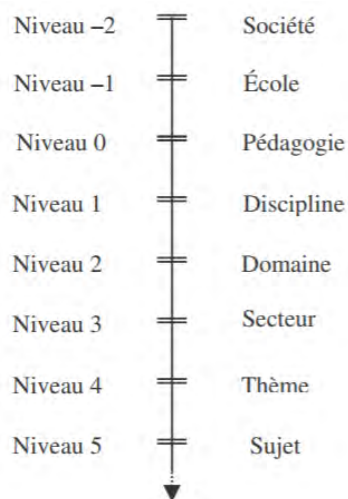


Figure 2 : Hiérarchie de niveaux de détermination didactique (schéma tiré de Chevallard, 2002)

Selon Chevallard (2002), le découpage en niveaux déterminés « a pour principal mérite de permettre un premier tri dans les paquets de contraintes présidant à l'étude scolaire » (p. 2). En effet, chaque niveau reflète des points d'appui et des contraintes qui concourent à élucider l'écologie de l'organisation des savoirs dans la sphère scolaire. Sans rentrer dans le détail de la description de chacun des niveaux, notons que le niveau pédagogique (niveau 0) concerne les points d'appui et contraintes relatifs « à l'étude d'un sujet quel qu'il soit, et donc en particulier à quelque discipline qu'il appartienne » (p. 12). Ce niveau constitue une frontière entre « le monde d'en dessous » (correspondant aux niveaux 1, 2, 3, 4 et 5) constitué des ressources et contraintes proposées par la noosphère spécialiste d'une discipline scolaire et le « monde d'en dessus », constitué des ressources et contraintes proposées par des spécialistes de l'institution scolaire (niveau -1) et des décideurs politiques qui font valoir leur point de vue sur l'école (niveau -2).

Au plan méthodologique, l'élucidation de l'épistémologie pratique des enseignants s'effectue à partir d'une démarche ascendante : accéder à son épistémologie pratique suppose d'abord de se rendre attentif au contenu enseigné et à la manière dont ce contenu est enseigné. C'est l'enquête des pratiques de classe qui fournit les indicateurs principaux permettant de reconstituer l'épistémologie pratique des enseignants. Parmi les indicateurs utilisés : d'abord, la manière dont l'enseignant conçoit les activités qu'il met en œuvre dans la classe, autrement dit l'action didactique telle qu'elle est prévue en amont par l'enseignant, à travers une succession articulée de milieux primitifs ; ensuite, les modalités d'intervention de l'enseignant dans le milieu. Notons que puisque l'enseignant ne montre dans l'institution « classe » que la partie des rapports aux objets qu'il estime conforme à l'institution concernée, nous ne pouvons avoir accès qu'à une partie son épistémologie pratique : celle qui est publique dans l'institution « classe » au moment de l'observation. Nous détaillerons plus amplement la construction des éléments de l'épistémologie pratique de l'enseignant dans la partie méthodologique (cf. Chapitre 5).

1.6 Conclusion

Nous retiendrons que les éléments de théorisation d'une action conjointe en didactique viennent de la nécessité de penser ensemble l'action de l'enseignant et des élèves. L'articulation d'un contrat et d'un milieu, au sens redéfinis ci-dessus, permet la production de significations nouvelles qui viennent enrichir à leur tour le milieu et qui sont l'objet d'une négociation entre enseignant et élèves afin d'aboutir à de nouveaux éléments de référence partagée. Cette dynamique est décrite par un premier système de descripteurs : le triplet de genèses. Dans ce processus de négociation, enseignant et élèves occupent des positions dissymétriques par rapport au savoir. Il apparait deux actions articulées l'une à l'autre selon une logique propre à chacune : face à chaque nouvelle tâche, question ou nouveau problème, l'élève construit des rapports nouveaux aux objets du milieu à partir de ce qu'il sait déjà, en fonction d'un but identifié ; face aux rapports aux objets du milieu exprimés par les élèves, l'enseignant les sélectionne, les oriente, les modifie ou les écarte, en fonction du programme qu'il est le seul à connaître à l'avance. In fine, c'est l'enseignant qui décide des arguments acceptables de la négociation, contrôle les responsabilités de chacun et gère l'avancée des savoirs : les modes d'intervention spécifiques de l'enseignant dans le milieu sont décrits par le triplet de techniques mésogénétiques, topogénétiques et chronogénétiques ainsi que par les structures fondamentales de l'action du professeur. D'autre part, l'analyse a priori des savoirs en jeu, outil de description du fonctionnement hypothétique des situations didactiques, retrace les potentialités et les limites du milieu du point de vue des participants. C'est la mise en relation des catégories issues de la modélisation de l'action conjointe avec l'analyse a priori des savoirs en jeu qui rend intelligible les logiques d'action des élèves et de l'enseignant. Enfin, nous avons souligné que le comparatisme en didactique est une entrée privilégiée pour explorer les processus de transposition : la comparaison des logiques d'action mises au jour dans des pratiques didactiques issues de plusieurs formes institutionnelles permet de révéler des dimensions transpositives qui auraient pu rester naturalisées, si l'on avait considéré qu'un seul contexte et au final, de reproblématiser les savoirs qui existent dans chacun des contextes.

Notre travail vise à explorer comment un même objet de savoir (les propriétés de la matière) est configuré dans des pratiques de classe incluses dans des institutions différentes (primaire, secondaire, Suisse romande, France) Dans ces conditions, l'élucidation des modalités de transposition propres à chaque contexte et la construction de l'analyse a priori nécessitent de faire appel à des savoirs scientifiques, à des savoirs philosophiques sur la nature et le mode de construction des savoirs scientifiques, à des savoirs de didactique des sciences, ces savoirs se rapportant soit aux sciences en général soit au domaine des propriétés de la matière, en particulier. La recension de ces savoirs fait l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 2 ÉTUDE DES SAVOIRS ÉPISTÉMOLOGIQUES ET DIDACTIQUES RELATIFS À L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES PHYSIQUES À L'ARTICULATION PRIMAIRE-SECONDAIRE

Ce chapitre se divise en deux parties :

- Dans la première partie, nous répertorions quelques études issues de l'épistémologie qui sont susceptibles de constituer des sources d'inspiration pour les rédacteurs des textes prescriptifs en France et en Suisse romande. La première section traite de la nature des savoirs scientifiques (théorie, modèle, champ empirique). La seconde section énumère quelques modèles de la logique de la construction des savoirs scientifiques (l'inductivisme, la démarche hypothéico-déductive, les programmes de recherche, l'anarchisme épistémologique) accompagnés de leur reprise et adaptation en didactique des sciences (leçon de choses/monstration, OHERIC/PHERIC⁵, changement conceptuel par conflit cognitif). Ces derniers travaux nous permettront, dans un chapitre ultérieur, de mieux caractériser les modalités de transposition à l'œuvre au sein des contextes institutionnels de l'enseignement des sciences physiques en France et en Suisse romande.
- Dans la seconde partie, nous nous intéressons aux études didactiques spécifiquement associés à l'enseignement des trois états de la matière (solide, liquide, gaz) et des changements d'état de l'eau faisant intervenir l'état gazeux (évaporation, ébullition, condensation). Trois perspectives sont particulièrement abordées : les études piagétienne qui se penchent sur la conservation ou non-conservation de la matière du point de vue des enfants lors d'opérations de partition et de déformation ; une récapitulation des résultats des études qui visent à lister les « conceptions initiales » des enfants sur les états et les changements d'état de l'eau ; les stratégies d'enseignement à propos des modèles particuliers spécialement développés au sein de la communauté des didacticiens francophones dans les années 90.

2.1 Les savoirs scientifiques et leur transposition

2.1.1 La nature des savoirs scientifiques et sa transposition

2.1.1.1 Théorie, modèle, champ empirique

Les physiciens cherchent à décrire, à expliquer et à prévoir le comportement des objets inanimés. Le corps de savoirs auquel ceux-ci aboutissent dans cette recherche est structuré en trois niveaux : théorie, modèle et champ empirique (Soler, 2009).

En sciences physiques, une théorie peut être définie comme un ensemble de principes, de lois et de concepts (souvent associés à des grandeurs) formant un tout cohérent et interconnecté.

⁵ OHERIC : acronyme pour la succession d'étapes [Observation, Hypothèse, Expérience, Résultats, Interprétation, Conclusion].

PHERIC : acronyme pour la succession d'étapes [Problème Posé, Hypothèses, Expérience, Résultats, Interprétation, Conclusion].

Une théorie possède un caractère universel et n'est pas censée pouvoir être prise en défaut : son champ de validité recouvre l'ensemble des faits observables relevant d'un domaine de réalité donné. Elle possède alors une fonction unificatrice dans le sens où elle rend compte de cet ensemble de phénomènes à partir d'un nombre restreint de principes. Élément constitutif d'une théorie, une loi scientifique est l'expression d'une corrélation stable et répétable entre des grandeurs physiques. La loi fait parfois intervenir des constantes physiques universelles. Par définition, elle permet de prédire la valeur de la mesure d'une grandeur si toutes les autres sont données. Un principe, quant à lui, est une sorte de loi d'un haut degré de généralité, qui dépasse de très loin les faits qui l'ont suggéré. Contrairement à la loi, son haut degré de généralité empêche une validation empirique directe et complète du principe, par exemple parce qu'il présuppose des conditions pratiques irréalisables (comme le principe d'inertie qui fait intervenir un système isolé d'influences extérieures). C'est pour la même raison, son haut degré de généralité, qu'une théorie n'est pas directement applicable à une situation donnée : « theories are always too complex for us to discern their consequences (...) » affirme Hacking (1983, p. 216-217). Selon Bunge (1975) :

« on peut dire que la théorie et l'expérience ne se rencontrent jamais en un combat singulier; leur rencontre se situe à un niveau intermédiaire (...) en présence, en particulier, des modèles théoriques et empiriques décrivant à la fois l'objet de la théorie [et] le dispositif expérimental employé » (p. 294).

Composante « opératoire » de la théorie, le modèle est créé pour répondre à une situation ou une classe de situations donnée. Le point-clé de son efficacité réside dans le mouvement de simplification qu'il opère par rapport à la complexité du réel. En effet, l'identification et la sélection des paramètres pertinents pour atteindre le but considéré permettent un allègement des contraintes mathématiques de la théorie :

« Il représente non pas les propriétés du réel, mais seulement certaines propriétés. Il a une fonction sélective des données de l'expérience ; il sépare le pertinent du non-pertinent par rapport à la problématique considérée. Il est un instrument d'intelligibilité d'un réel dont la complexité des propriétés ne permet pas l'entière compréhension par la science : disons de façon plus explicite qu'en physique par exemple, la modélisation, par la sélection des données, par la considération exclusive de certains paramètres, par la précision d'hypothèses simplificatrices, permet la mise en œuvre de la mathématisation » (Bachelard, S., 1979, p. 9).

Dans ces conditions, le modèle permet alors de produire des prévisions comparables à la réalité expérimentale : « L'exploration des propriétés intrinsèques du modèle conduit à construire des scénarios de comportement pour les objets virtuels construits. Ces scénarios doivent ensuite être confrontés à la réalité empirique » (Soler, 2009, p. 61). Ce mode de construction d'un modèle a des conséquences sur sa nature. Ainsi, l'idéalisation qu'il fait subir au réel implique qu'il possède nécessairement un domaine de validité limité : il n'est valable que pour certains phénomènes et pour un certain domaine d'étude. D'autre part, il est possible que, pour une même situation à étudier, coexistent des modèles concurrents ou complémentaires. En bref, contrairement au système théorique dont il dérive, le modèle n'a prétention ni à l'universalité

ni à l'exclusivité. Enfin, puisqu'il présente des solutions exemplaires à des problèmes, le modèle possède une fonction heuristique dans le sens où il guide les futures recherches en imposant à la fois un champ d'observation et une méthodologie. Le modèle, par définition hypothétique, modifiable et d'un domaine de validité restreint, peut donc être considéré comme un médiateur entre une théorie et une situation expérimentale donnée.

Dernier champ de connaissance scientifique, le champ empirique se rapporte aux faits, définis comme les données immédiatement accessibles à l'observation. Parmi ceux-ci, le phénomène est un fait associé à un changement physique qui est reproductible (contrairement à l'évènement lui aussi associé à un changement mais qui est non répétable). Dans cette recension, n'oublions pas les données expérimentales, tels les résultats de mesure, qui constituent une grande partie de la matière première sur laquelle travaillent les physiciens.

L'activité centrale en physique vise à produire des connexions entre deux niveaux de savoirs : d'une part, celui des constructions théoriques (modèles y compris) et d'autre part celui du champ empirique des faits, phénomènes et évènements. Cette mise en lien implique une activité de modélisation qui consiste, d'un côté, à spécifier les éléments théoriques qui correspondent à la situation donnée et de l'autre, à effectuer une opération de simplification sur le réel en posant certaines hypothèses.

2.1.1.2 Étude de la transposition du triplet {théorie, modèle, champ empirique}

Comme tous les savoirs destinés à être implantés dans les salles de classe, ce triplet {théorie, modèle, champ empirique}, qui possède une fonction singulière et qui est lié à des pratiques sociales spécifiques dans les institutions scientifiques d'origine, subit des transformations afin de s'adapter aux contraintes spécifiques de l'institution scolaire. L'analyse de ce mouvement transpositif a été effectuée par Tiberghien, Gaidioz, Veillard & Vince (1994, 2009, 2011) qui en ont saisi deux types de spécificités majeures.

La première concerne la nature des significations présentes dans la sphère institutionnelle : « When analysing the usual physics teaching content, the theory is not differentiated from the model, particularly from the components of the model that come from the theory » (Tiberghien & al., 2009, p. 2283). Ainsi, selon Veillard, Tiberghien et Vince (2011, p. 207), la nuance entre théorie et modèle est assez peu visible au niveau de l'enseignement secondaire. Autrement dit, à l'école obligatoire, la distinction modèle-théorie ne se justifie pas, au regard du (faible) niveau d'abstraction exigible dans les programmes : Tiberghien & al. (2009) proposent alors de regrouper toutes les constructions théoriques présentes en classe de physique dans une catégorie unique qu'elle nomme « Monde des théories et des modèles ». La transposition didactique ne laisse subsister que deux niveaux de connaissance, le « Monde des théories et des modèles » et le « Monde des objets et des évènements » (cf. Figure 3) :

« Le monde des théories et modèles renvoie donc aux concepts généraux et aux constructions abstraites plus locales permettant d'étudier un type d'objets et d'évènements ; le monde des objets et des évènements renvoie à ce qui est accessible par la perception de façon directe (observation) et/ou par le biais d'instruments de mesure » (Veillard & al., 2011, p. 207).

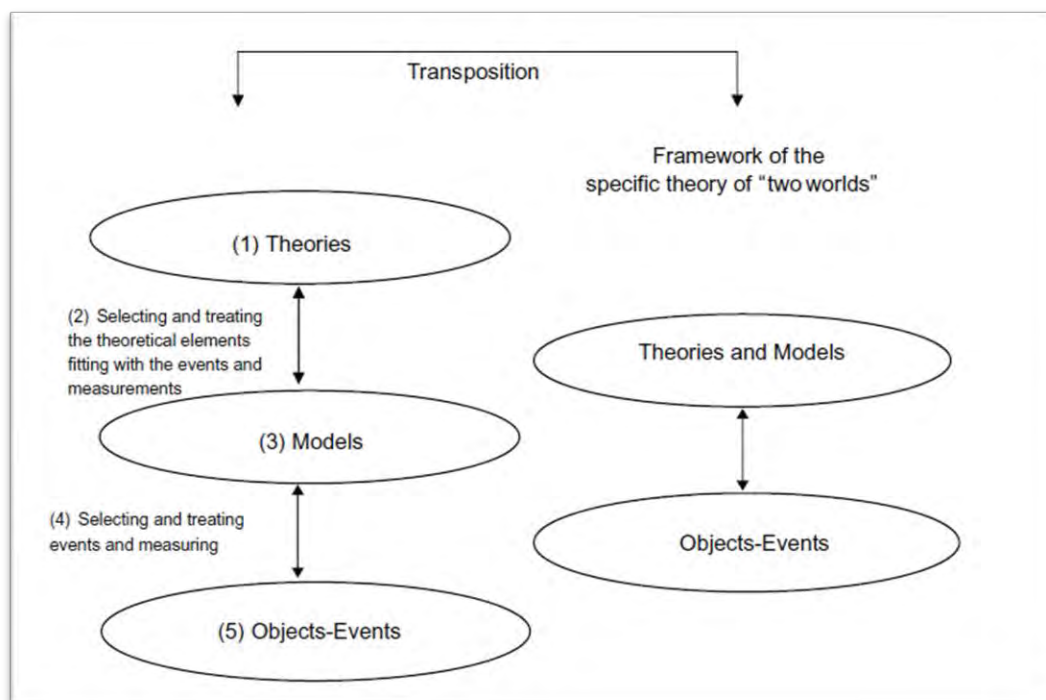


Figure 3 : Schéma illustrant la transposition de la structure épistémologique de la physique tiré de Tiberghien (2009, p. 2283)

La deuxième spécificité du mouvement transpositif concerne les systèmes explicatifs proposés spontanément par les élèves. Tiberghien & al. (2009) font l'hypothèse qu'il existe une certaine modélisation du monde matériel en œuvre au sein des pratiques quotidiennes :

« We consider that in everyday life, explanations or interpretations of material situations are guided by ideas with some general common approach like categorisation and causality and more local theories associated to specific sets of situations. (...) In our theoretical framework we emphasise that modelling activity involves explanatory ideas that we associate with a theoretical level on the one hand and with observation, perception, and possible measurement (such as ambient temperature) of objects and events on the other hand. This leads us to a similar structure to that involved in physics knowledge at school » (p. 2286).

Il existe donc une similarité structurelle entre les systèmes explicatifs du physicien et ceux de l'élève et du profane. Ce point de vue conduit à dédoubler le schéma précédent en imaginant que chacun des deux mondes, les théories et modèles, d'une part et les objets et événements, d'autre part peuvent se référer à la sphère institutionnelle scientifique ou bien à la sphère institutionnelle de la vie quotidienne (cf. Figure 4).

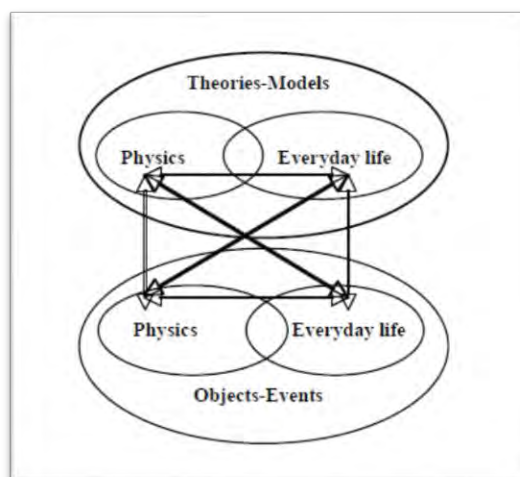


Figure 4 : Schéma illustrant la théorie des deux mondes tiré de Tiberghien (2009, p. 2287)

L'idée de « théorie naïve » renvoie à certaines études issues de la psychologie cognitive qui s'intéressent aux apprentissages des savoirs scientifiques : Tiberghien & Vince (2005) affirment en effet que « ce choix s'appuie sur les travaux relatifs aux théories naïves de la vie quotidienne ou des enfants (Carey, 1985 ; Vosniadou, 1994) » (p. 5). Dans le dernier paragraphe de ce chapitre, nous nous positionnerons sur certains aspects de ces études.

2.1.1.3 Conclusion

Du point de vue du chercheur qui analyse les pratiques d'enseignement et d'apprentissage, la théorie des deux mondes fournit des clés de lecture intéressantes vis-à-vis des objets du milieu qui apparaissent au fil des interactions sociales enseignant - élèves. Elle lui permet de les catégoriser en six classes distinctes : les objets qui relèvent du « monde des théories et des modèles » (version naïve ou scientifique), les objets qui relèvent du « monde des objets et événements » (version naïve ou scientifique) et les objets qui portent sur les liens entre ces deux mondes (version naïve ou scientifique, avec des croisements possibles).

Il est important de noter, afin d'éviter des effets de naturalisation, que la caractérisation de la nature des éléments produits dans les discours des acteurs de la classe à l'aide de la théorie des deux mondes dépend de l'état des connaissances du sujet considéré et de ses interactions avec son environnement :

- Premièrement, le langage procède, par nature, à une sélection et interprétation des événements et constitue donc déjà une modélisation de la réalité : « À mon avis, nous ne pourrions prononcer une seule phrase qui traduise en réalité un pur fait d'expérience ; les mots les plus simples comme jaune, doux, amer (...) qui ne semblent indiquer que de simples sensations expriment déjà des concepts qui ont été formés par abstraction à partir de multiples faits d'expérience» (Boltzmann, cité par Bachelard, 1979).
- Deuxièmement, l'habitude professionnelle des scientifiques les pousse parfois à projeter certains concepts théoriques sur la réalité sans passer par une phase de description brute (comme le physicien qui se réfère spontanément à une mesure de courant alors que le seul fait perceptible est le mouvement d'une aiguille) : « tout modèle, d'un niveau explicatif

donné tend, par sa simple vulgarisation et son renforcement par l'expérience, à apparaître comme quasi-descriptif au bout d'un certain temps » (Walliser, 1977, cité par Larcher, Chomat & Méheut, 1990, p. 52).

- Troisièmement, un terme ou une expression n'appartiennent pas en soi à la sphère institutionnelle scientifique ou bien à la sphère institutionnelle de la vie quotidienne puisque beaucoup de mots ou de tournures de phrase naviguent, dérivent, transitent entre plusieurs sphères de pratiques, en renouvelant leurs significations dans ce mouvement : ainsi, il existe en physique « des concepts qui sont désignés par des mots ou expressions du langage courant avec des significations différentes de celles de la vie de tous les jours, par exemple *énergie, force, puissance, action* ou *agir, accélération ou accélérer*, etc. » mais aussi « des objets et des événements qui sont désignés par des mots ou expressions du langage courant avec des sens identiques (ou proches) en physique et dans la vie quotidienne : *voiture, appareil de mesure*, ou *tomber, toucher, vibrer, devenir*, etc. » (Gaidioz, Vince & Tiberghien, 2004, p. 1033-1034).

Au final, un même élément de discours peut s'intégrer au sein d'un monde ou d'un autre en fonction de celui qui l'énonce : c'est la raison pour laquelle nous avons choisi d'opter pour une perspective pragmatiste de l'analyse des actions de classe, à travers la notion de « rapport aux objets du milieu » qui prend en compte le point de vue des acteurs sur leur propre action.

2.1.2 Les modes d'élaboration des savoirs scientifiques et leur transposition

Les savoirs scientifiques décrits ci-dessus {théorie, modèle, champ empirique} sont issus à la fois d'un raisonnement et d'une confrontation au réel. Mais quelle est la place du raisonnement par rapport au recours à l'expérience (et vice-versa) ? Comment s'articule le va-et-vient entre ces deux composantes ? Par quels moyens de nouveaux savoirs viennent s'ajouter en permanence à ceux déjà reconnus par la communauté scientifique ? Autrement dit, comment les théories et modèles scientifiques se construisent-ils et évoluent-ils ? Telles sont les questions classiques auxquelles le champ de la philosophie des sciences tâche de répondre, avec souvent des conséquences non négligeables sur les démarches de reconstruction des savoirs scientifiques à l'école. En effet, les réponses à ces questions, constituées en courants épistémologiques, sont des sources d'inspiration pour les décideurs qui désignent les savoirs scientifiques à enseigner et comment ils doivent l'être. Nous nous proposons de répertorier quelques courants significatifs du champ (l'inductivisme, la démarche hypothético-déductive, les programmes de recherche, l'anarchisme épistémologique), accompagnés de leur reprise/transposition éventuelle en didactique des sciences.

2.1.2.1 L'inductivisme et sa transposition

Définition de l'inductivisme en philosophie des sciences

Selon la conception inductiviste de la construction des savoirs scientifiques, les théories constituent des généralisations de données d'observation :

« Les énoncés sur l'état du monde (...) doivent être justifiés ou établis comme vrais de façon directe par l'utilisation des sens d'un observateur sans préjugé. Les énoncés ainsi produits formeront la base sur laquelle prennent naissance les lois et théories qui constituent le savoir scientifique » (Chalmers, 1976/1982, p. 23).

Il est ainsi possible de « légitim[er], sous certaines conditions, la généralisation d'une série finie d'énoncés d'observations singuliers en une loi universelle » (Chalmers, 1976/1982, p. 25). L'inductivisme repose sur trois conditions :

1. Le nombre d'énoncés d'observation formant la base de la généralisation doit être élevé.
2. Les observations doivent être répétées dans une grande variété de conditions.
3. Aucun énoncé d'observation accepté ne doit entrer en concurrence avec la loi universelle qui en est dérivée.

Le point de vue inductiviste apparaît dès l'aube de la science moderne dans les écrits des scientifiques émergents (Bacon, Galilée ou encore Newton). Afin d'asseoir leurs résultats et, dans un mouvement de rejet des propriétés et qualités occultes promues tout le long du Moyen-Âge, il s'agissait de démontrer que leurs résultats étaient dictés directement par l'expérience, sans la dépasser, d'où, par exemple, le célèbre « hypothèses non fingo » de Newton :

« En effet, tout ce qui n'est pas déduit des phénomènes doit être appelé hypothèse et les hypothèses, qu'elles soient métaphysiques, physiques, se rapportant aux qualités occultes ou mécaniques, n'ont pas de place en philosophie expérimentale. En cette philosophie, les propositions sont déduites des phénomènes et rendues générales par induction » (Newton, 1713, p. 117).

Plus tard, l'inductivisme a trouvé un appui considérable dans l'épistémologie positiviste défendue par Comte à la fin du 19^{ième} siècle : les sciences doivent se limiter à la formulation de relations entre les phénomènes sans chercher à déterminer leur nature intrinsèque. Selon une formule bien connue, elles doivent répondre au « comment » des phénomènes à travers la découverte de lois scientifiques et non au « pourquoi ».

Critiques de l'inductivisme en philosophie des sciences : les limites

Le point de vue inductiviste a été critiqué quasiment dès sa naissance, depuis Hume au 18^{ième} siècle jusqu'aux philosophes contemporains. Sans rentrer dans les détails de la diversité des critiques émises à son égard, retenons-en deux. Tout d'abord, un ensemble fini d'observations sur des événements passés ne peut garantir que ces événements se produiront toujours dans le futur :

« Le fait que les prémisses d'une inférence inductive sont vraies n'implique pas que la conclusion l'est. Supposons, par exemple, que j'aie observé un grand nombre de corbeaux dans des circonstances fort variées ; ayant constaté que tous ceux observés jusqu'à ce jour étaient noirs, j'en conclus : « tous les corbeaux sont noirs ». (...) Mais la logique n'offre aucune garantie que le

prochain corbeau que j'observerai ne sera pas rose » (Chalmers, 1976/1982, p. 39).

Ce type d'argument conduira Hume à affirmer que le moteur du raisonnement inductif est de nature psychologique et non logique.

Ensuite, un énoncé d'observation n'est pas neutre de tout préjugé, comme le défend l'inductivisme. En fait, tout énoncé d'observation est corrélé à une théorie des deux manières suivantes : d'une part, « les énoncés d'observation seront toujours formulés dans le langage d'une théorie et seront aussi précis que le cadre théorique ou conceptuel qu'ils utilisent » (Chalmers, 1976/1982, p. 61). D'autre part, toute observation est guidée et contrainte par une théorie, ce qui permet de savoir quoi observer dans une situation parmi d'innombrables perceptions potentielles : « Les observations et les expériences sont faites pour tester ou pour faire la lumière sur une théorie, et seules les observations qui s'y rapportent sont dignes d'être notées » (Chalmers, 1976/1982, p. 67). On reconnaît là la fonction heuristique des modèles décrite ci-dessus : les modèles informent les scientifiques sur le champ d'observation pertinent à considérer.

Quelle est la place de l'inductivisme dans les classes ?

Au niveau transpositif, la perspective inductiviste a rencontré un écho considérable dans les programmes et manuels scolaires français depuis la fin du 19^{ième} siècle. Elle s'est d'abord traduite par les « leçons de choses », méthode d'enseignement des sciences basée sur l'observation et le mouvement du concret vers l'abstrait et dont la filiation avec le dogme inductiviste est évidente :

« En commençant par observer les "choses", l'enfant commencerait comme le savant lui-même, qui énonce les lois de la nature grâce à ses observations répétées, de sorte que, comme Paul Bert n'hésite pas à l'écrire, il n'y aurait aucune différence de nature, mais seulement de degrés, entre les leçons de choses de l'école primaire et la science authentique » (Kahn, 2000, p.13).

En se basant sur le sens commun et sur l'intuition des élèves, et en les faisant eux-mêmes reconstruire voire réinventer les savoirs scientifiques, il s'agissait de les faire passer « d'auditeur docile, prompt à apprendre et prêt à réciter, (...) produit d'un dressage » (O. Auriac, inspecteur de l'Instruction publique, cité par Kahn, 2000, p. 17) à la position d'acteur de sa propre éducation. Dans ces conditions, l'expérience n'a plus le statut didactique habituel pour l'époque d'illustration du discours de l'enseignant mais est supposée initier une dynamique active de conceptualisation et d'abstraction de la part des élèves. Une rupture avec un enseignement dogmatique et transmissif est donc explicitement revendiquée à travers la promotion des leçons de choses : cette méthode se maintiendra dans les programmes des sciences naturelles jusqu'aux années soixante-dix en France et imprènera fortement l'épistémologie professionnelle des enseignants au point qu'aujourd'hui encore le point de vue qu'ils entretiennent vis-à-vis des sciences et de son enseignement est de nature inductiviste (Cariou, 2010, 2011).

Critiques de la place de l'inductivisme dans les classes : reprise des limites révélées par la philosophie des sciences

Évidemment, l'idée qu'il suffirait, pour toute thématique d'enseignement scientifique, « de partir de l'expérience pour faire émerger chez les élèves les connaissances à enseigner, comme si les données d'observation (...) étaient porteuses d'information pouvant être interprétées sans la médiation de connaissances préalables et de manière univoque » (Bächtold, 2012, p. 12) semble naïve, et difficilement applicable en pratique. En fait, pour que cette approche fonctionne, il faut que l'expérience soit mise en scène, c'est-à-dire que les aspects pertinents pour le futur modèle à enseigner soient artificiellement valorisés tandis que les autres soient camouflés : c'est ce que Johsua (1989) nomme de façon critique la « monstration ». Mais, même à l'aide de ce subterfuge, Johsua démontre l'écart insurmontable qui existe entre l'expérience dont la portée reste limitée et la théorie dont on voudrait que l'expérience soit la conséquence directe :

« l'idéologie inductiviste exclut tout élément de rupture (...) entre le donné phénoménologique et les conséquences de l'analyse scientifique de ce donné. Quand cette conséquence est de type « loi descriptive » (obtenue par « des mesures », par exemple), la fiction de cette continuité est déjà difficile à défendre, mais cela tend à l'impossible quand il faut atteindre à des théories » (Johsua, 1989, p.49).

Il donne l'exemple de l'observation de la chute libre dont est censée découler chez les élèves l'idée d'attraction terrestre et de pesanteur : ce passage soi-disant naturel et automatique est hautement contestable. Selon Gohau, cité par Cariou (2011, p. 93) :

« la théorie illumine tant l'expérience de l'arrière que le professeur voit le rapport de l'un à l'autre comme éclatant. Il oublie que l'élève voit l'expérience par sa face "obscur". L'expérience ne conduit directement à la théorie que celui...qui connaît la théorie »

Au final :

« la prédominance de l'inductivisme (...) conduit à une pratique d'enseignement forcément typée, où tout est bâti de manière à contourner, gommer ou nier les relations forcément complexes entre l'expérience et la modélisation. Et cela, à son tour, conduit, paradoxalement, à un très net appauvrissement de la fonction et du contenu du rapport à l'expérimental en situation scolaire » (Johsua, 1989, p. 29).

Gohau, cité par Cariou (2011, p. 85), conclut encore plus sévèrement que « les techniques inductives ont abouti à des absurdités en croyant qu'il suffisait de retourner la méthode traditionnelle déductive pour fonder une pédagogie active de découverte ».

2.1.2.2 La méthode hypothético-déductive et sa transposition

Définition de la méthode hypothético-déductive en philosophie des sciences

La méthode hypothético-déductive a été formalisée par le physiologiste Claude Bernard dans son ouvrage *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale* en 1865 :

« Le savant complet est celui qui embrasse à la fois la théorie et la pratique expérimentale. 1° il constate un fait ; 2° à propos de ce fait, une idée naît dans son esprit ; 3° en vue de cette idée, il raisonne, institue une expérience, en imagine et en réalise les conditions matérielles. 4° De cette expérience résultent de nouveaux phénomènes qu'il faut observer, et ainsi de suite. L'esprit du savant se trouve en quelque sorte toujours placé entre deux observations : l'une qui sert de point de départ au raisonnement, et l'autre qui lui sert de conclusion. (...) L'idée a priori ou mieux l'hypothèse est le stimulus de l'expérience, et on doit s'y laisser aller librement, pourvu qu'on observe les résultats de l'expérience d'une manière rigoureuse et complète. Si l'hypothèse ne se vérifie pas et disparaît, les faits qu'elle aura servi à trouver resteront néanmoins acquis comme des matériaux inébranlables de la science » (1865, p. 43-44).

La méthode hypothético-déductive se décline donc en plusieurs phases qui constituent le processus de production des connaissances scientifiques : à une phase préliminaire d'observation de faits ou de phénomènes succède une phase d'élaboration d'une (ou plusieurs) hypothèse(s) nécessairement réfutable(s). Ces hypothèses donnent lieu à des prédictions qui sont ensuite comparées à d'autres faits ou phénomènes cette fois artificiellement produits à l'aide d'une expérience ou d'un montage expérimental :

« Soit une hypothèse théorique qui est conforme à toutes les données dont on dispose. On en déduit une conséquence nouvelle, qui est expérimentalement testable [une prédiction]. De deux choses l'une : i) soit cette conséquence nouvelle se révèle contraire à l'expérience, on considère alors que l'hypothèse est infirmée ou encore réfutée par l'expérience ; ii) soit l'expérience est telle qu'on l'avait prévu par déduction, on considère alors que l'hypothèse est confirmée par l'expérience » (Roux, 2007, p.11).

Les potentialités et l'originalité de l'exposition de la méthode résident dans plusieurs facteurs. D'abord, elle prend la forme d'une démarche avec des étapes successives à suivre : ce schéma de la méthode se figera d'ailleurs au fur et à mesure de toutes les reprises ultérieures (épistémologiques ou didactiques), même si Claude Bernard s'était déjà prémuni contre toute tentative d'en faire une méthode stéréotypée (Bernard, 1865, p. 44). Ensuite, la notion d'hypothèse devient le pivot central autour duquel se construisent les connaissances. Enfin, une nouveauté majeure avancée par la méthode hypothético-déductive concerne la différenciation faite entre l'expérience commune (l'observation passive des faits et phénomènes lors de la première étape) et l'expérience scientifique (la production artificielle de certains phénomènes à travers un montage expérimental en vue d'évaluer la vraisemblance d'une hypothèse lors de la troisième étape) : cette différenciation est devenue un acquis de l'épistémologie contemporaine, y compris dans les mouvances qui s'affirment en opposition avec la méthode hypothético-déductive.

Critiques de la méthode hypothético-déductive en philosophie des sciences

La démarche hypothético-déductive, entendue comme l'ensemble d'étapes fixes et universelles supposées régir l'ensemble de l'activité scientifique décrite ci-dessus, fait l'objet de nombreuses critiques, les plus virulentes ayant été développées au 20^{ième} siècle : le maillon le plus

controversé concerne la validation ou invalidation de l'hypothèse à partir de l'expérience. Rappelons que si la prédiction, déduite de l'hypothèse se révèle contraire à l'expérience, on considère alors que l'hypothèse est réfutée par l'expérience. Si, au contraire, elle correspond aux résultats de l'expérience, on considère que l'hypothèse est confirmée (ou du moins corroborée) par l'expérience. Ce point de vue a été battu en brèche par Duhem (1906/1997) et Quine (1951) avec des arguments comparables. Passons rapidement en revue les termes de la controverse.

- D'abord, il n'est pas possible qu'une expérience soit capable de valider ou invalider une hypothèse isolée. En effet, pour réaliser et interpréter l'expérience supposée tester l'hypothèse, on met en œuvre tout un système théorique : ainsi, tout instrument scientifique est « une théorie matérialisée » dans le sens où l'interprétation de la mesure fournie requiert de faire appel à plusieurs éléments théoriques. Or, si l'expérience n'est pas en accord avec la prédiction déduite de l'hypothèse, la logique ne permet pas de discerner quel est l'élément « faillible » du système théorique mis en œuvre, c'est-à-dire celui qui serait responsable du résultat négatif de l'expérience. C'est l'ensemble des propositions du système théorique qui doit être remis en question, et pas seulement l'hypothèse isolée que le physicien veut tester. Cette position, qui relève du holisme épistémologique, est illustrée par Soler (2001) à propos de l'expérience de Foucault :

« *D'un point de vue historique*, l'expérience de Foucault, réalisée, conduisit à l'énoncé d'observation "la tache verdâtre est à droite de l'incolore" ; d'où l'on remonta, via une dérivation faisant intervenir de nombreuses propositions relatives au comportement de la lumière et au fonctionnement de l'appareil de Foucault, à l'énoncé "la lumière marche plus vite dans l'air que dans l'eau" ; et d'où l'on conclut à la fausseté de l'hypothèse d'une lumière corpusculaire. Mais *d'un point de vue logique*, rien n'impose *nécessairement* cette dernière conclusion. La logique oblige seulement à conclure que l'une au moins des hypothèses utilisées dans l'ensemble du raisonnement est fausse, sans toutefois indiquer laquelle » (p. 7)

- Ensuite, la méthode hypothético-déductive est intrinsèquement liée à l'idée d'expérience cruciale : l'expérience cruciale doit permettre de trancher entre deux hypothèses concurrentes en réfutant de manière irrécusable une des deux hypothèses et en confirmant l'autre. Or, il est impossible d'être sûr que, pour une expérience donnée, toutes les hypothèses potentiellement explicatives ont été imaginées :

« Admettons, pour un instant, que dans deux systèmes, (...) tout soit nécessaire de nécessité logique, sauf une seule hypothèse ; admettons, par conséquent, que les faits, en condamnant l'un des deux systèmes, condamnent à coup sûr la seule supposition douteuse qu'il renferme. En résulte-t-il qu'on puisse trouver dans *l'experimentum crucis* un procédé irréfutable pour transformer en vérité démontrée l'une des deux hypothèses en présence, de même que la réduction à l'absurde d'une proposition géométrique confère la certitude à la proposition contradictoire ? Entre deux théorèmes de géométrie qui sont contradictoires entre eux, il n'y a pas de place pour un troisième

jugement ; si l'un est faux, l'autre est nécessairement vrai. Deux hypothèses constituent-elles jamais un dilemme aussi rigoureux ? Oserons-nous jamais affirmer qu'aucune autre hypothèse n'est imaginable ? » (Duhem, 1906/1997, p. 288).

Autrement dit, puisque le physicien ne peut pas « épuiser toutes les suppositions imaginables » (Duhem, 1906/1997, p. 289) à propos d'une expérience, même s'il était possible d'affirmer que l'une des hypothèses est réfutée par l'expérience (ce à quoi le holisme épistémologique s'oppose), il ne serait pas permis pour autant d'en déduire que l'autre hypothèse en présence est confirmée.

- Enfin, la validation ou invalidation de l'hypothèse à partir de l'expérience que défend la démarche hypothético-déductive ne correspond pas aux données issues de l'histoire des sciences :

« Pour n'importe quelle théorie scientifique classique, que ce soit au moment de sa formulation ou à une époque ultérieure, on peut trouver des comptes rendus d'observation, généralement acceptés à l'époque, qui furent jugés contradictoires avec la théorie. Ces théories n'ont pourtant pas été rejetées, et il est heureux pour la science qu'il en ait été ainsi » (Chalmers, 1976/1982, p.116).

Chalmers donne quelques exemples de faits d'observation sur lesquels il aurait été possible de s'appuyer pour invalider une théorie mais que la communauté scientifique a décidé de mettre temporairement de côté (la trajectoire de Mercure en désaccord avec la théorie mécanique newtonienne, les mesures des chaleurs spécifiques des gaz en désaccord avec la théorie cinétique des gaz de Maxwell, etc.).

Conclusion

Au final, l'acceptation ou le rejet d'une hypothèse donnée fait appel à d'autres paramètres que les seuls résultats de l'expérience. Entrent en jeu un certain conservatisme théorique ou des facteurs esthétiques notamment :

« [Les scientifiques] hésitent à adopter une hypothèse nouvelle ou à rejeter une hypothèse ancienne, si ce geste conduit au final, (...) à des remaniements trop nombreux et trop importants [des acquis théoriques et observationnels antérieurs] (...). Les hommes de science élisent en général les théories les plus simples, celles dont les explications apparaissent les plus élégantes » (Soler, 2001, p. 8)

Accepter ou rejeter une hypothèse ne relève donc pas du choix d'une seule personne devant une expérience unique mais de celui d'une communauté scientifique plongée dans un ancrage théorique particulier et dans un contexte social spécifique : c'est le fruit d'un débat scientifique qui peut s'étaler sur une longue période de temps. Cet argument rompt avec la présentation individualiste du scientifique qui serait le seul décisionnaire de l'interprétation de son expérience tel que décrit par Claude Bernard.

Quelle est la place de la méthode hypothético-déductive dans les classes ?

Au niveau transpositif, la démarche hypothético-déductive a été une source d'inspiration majeure pour les didacticiens des sciences d'abord, puis pour les concepteurs de programmes et de manuels scolaires ensuite. Son influence a démarré dans les années soixante-dix dans une dynamique de rejet des principes inductivistes en vigueur jusque-là dans l'enseignement des sciences (cf ci-dessus) et se poursuit aujourd'hui encore à travers les programmes et plans d'étude francophones (cf. Chapitre 3). En effet, l'approche inductiviste a été la cible de critiques de plus en plus virulentes au fil du temps. Ainsi, la « leçon de chose » est accusée de favoriser une posture passive chez les élèves et est renvoyée dos à dos à la méthode dogmatique et transmissive qu'elle prétendait pourtant surpasser :

« Héraïl montre que si imposer une théorie est une forme de dogmatisme, imposer une expérience en est une autre qui la vaut bien. Pire, une telle approche avance masquée sous le couvert de l'expérience, dont la seule présence suffirait à abolir tout dogmatisme » (Cariou, 2011, p. 93).

La démarche hypothético-déductive a ainsi pu être considérée comme une alternative pertinente, palliant les défauts et limites du point de vue inductiviste (Johsua & Dupin, 1986). Le schéma classique promu par Claude Bernard est repris dans la thèse de Giordan en 1976 sous le sigle OHERIC (observation, hypothèses, expériences, résultats, interprétation, conclusion). Puis, il subit des transformations au fil de son usage par la communauté des didacticiens des sciences et donne lieu à de multiples dérivés (Cariou, 2010 ; Giordan, 1999 ; Gil-Perez, 1993 ; Develay, 1989) : intercaler une étape dans le processus (par exemple, la prise en compte de certaines données initiales en amont de la première étape), remplacer une étape par une autre (par exemple, substituer la construction d'un problème à une activité d'observation lors de la première étape), abandonner la linéarité du processus et le remplacer par une vision plus spiralaire, etc. Toutes les versions ont cependant en commun la place centrale accordée aux hypothèses imaginées par les élèves et à leurs vérifications expérimentales :

« Un moyen [de reconnaître dans la classe le rôle éminent des hypothèses] est de fonder certaines séquences sur les propositions des élèves, en mettant en place de conditions telles qu'ils puissent élaborer des hypothèses, les soumettre au débat en classe et soupeser leur pertinence, en concevoir des moyens de contrôle, eux-mêmes débattus, et les rejeter ou non après leurs mises à l'épreuve » (Cariou, 2011, p. 98).

Décalages transpositifs entre la méthode hypothético-déductive dans les classes et la démarche des scientifiques

Les hypothèses, en classe de sciences, ne ressemblent pas aux hypothèses savantes

La notion d'hypothèse, pivot central autour duquel se construisent les connaissances dans la démarche hypothético-déductive, recouvrent des réalités différentes selon son contexte d'usage (Gyllenpalm & Wickman, 2011).

Les hypothèses formulées au sein des communautés scientifiques de référence présentent plusieurs caractéristiques : ce sont des propositions provisoires qui visent à fournir une explication vraisemblable d'un ensemble de faits et qui doivent être soumise au contrôle de l'expérience, d'une part ; elles s'appuient sur un arrière-plan théorique et méthodologique accepté par une communauté donnée, d'autre part.

Dans la version transposée de la notion d'hypothèse pour l'école, ce sont les élèves qui sont censés prendre en charge la construction des hypothèses. Les ressources sur lesquelles ils s'appuient pour les construire ne sont pas comparables avec celles des communautés scientifiques de référence : les « hypothèses » des élèves sont liées à leur expérience quotidienne vis-à-vis des objets de la situation didactique. L'individualité de cette expérience quotidienne implique que ces « hypothèses » possèdent une part de contingence élevée, bien éloignée des contraintes théoriques et méthodologiques que se donnent les scientifiques pour imaginer les leurs. C'est dans ce sens qu'il est possible d'affirmer que les hypothèses, en classe de sciences, ne ressemblent pas aux hypothèses savantes.

Le problème de la situation-problème n'est pas le problème scientifique

Parmi les modifications de l'enchaînement initial des étapes, une d'entre elles nous intéresse particulièrement car elle a connu un grand succès dans les programmes scolaires francophones : il s'agit du remplacement du recueil d'observations de la première étape par la construction d'une situation-problème ou d'une situation déclenchante par l'enseignant.

Robardet (2001) envisage, par exemple, de démarrer le raisonnement hypothético-déductif « en propos[ant] aux élèves une ou plusieurs questions associées à une situation très concrète » (p.10) puis d'engager un « travail de problématisation pour permettre aux élèves de passer des questions initiales au problème proprement dit » (p.12). Robardet (2001) suggère ensuite que « le professeur [s'appuie] sur le caractère énigmatique ou paradoxal pour l'élève de la situation choisie » (p.12). Donc, comme le souligne Mathé, Méheut & De Hosson (2008),

« Le problème à résoudre naîtrait donc d'une contradiction – anticipée et organisée par l'enseignant – entre les idées de l'élève et une situation élaborée à dessein. Un élève s'attend par exemple à observer telle manifestation de ce qu'il pense dans la nature, son attente est déçue (l'observation n'est pas conforme à son attente), et c'est alors que le problème émerge » (p. 63).

À ce stade, mesurons ici la distance qui existe entre le genre de problèmes qu'il est conseillé de soumettre aux élèves dans les classes et les problèmes auxquels s'attellent les scientifiques. Pour cela, nous reprenons l'exemple développé par Chalmers (1976/1982, p. 139-140) à propos du cheminement parcouru par Newton :

« [Newton] commença par envisager qu'un soleil, aussi bien qu'une planète, se déplacent sous l'influence de leur attraction mutuelle. Puis il considéra la taille finie des planètes et les traita comme des sphères⁶. Après avoir résolu le problème mathématique posé par ce changement, Newton parvint à prendre en compte d'autres complications, envisageant par exemple la rotation des

⁶ Sous-entendu : et non des objets ponctuels, comme précédemment

planètes sur elles-mêmes ou le fait qu'elles subissent les forces gravitationnelles des autres planètes et pas seulement celles du Soleil. [Puis], il aborda le cas des planètes non-sphériques, etc. ».

Les problèmes scientifiques consistent donc en une exploration de proche en proche du pouvoir explicatif d'une théorie, déclinée en plusieurs modèles successifs qui tentent d'englober progressivement de plus en plus de phénomènes. Ce sont les théories (et les modèles qui les opérationnalisent) qui indiquent aux scientifiques où sont les problèmes. Par conséquent, ce qui fait problème n'est pas universel : les problèmes ne sont partagés qu'à l'intérieur d'une communauté scientifique particulière. Comme le démontre Toulmin (1973), les problèmes aristotéliens ne sont pas commensurables aux problèmes newtoniens. Pas plus que les problèmes des élèves, tels que les suggère la mise en œuvre des situations déclenchantes, ne le sont pas avec ceux des scientifiques.

Conclusion

En conclusion, la méthode hypothético-déductive, popularisée par Claude Bernard au 19^{ième} siècle a bénéficié d'un engouement conséquent auprès des didacticiens des sciences un siècle plus tard. De nombreuses versions didactiques inspirées du schéma princeps proposent des processus idéalisés à mettre en œuvre dans les salles de classe. Plusieurs points de décalage existent entre ces versions et la démarche réellement suivie par les scientifiques : parmi eux, la validation et l'invalidation d'une hypothèse, loin d'être un résultat individuel et immédiat, dérive en réalité d'un consensus établi à l'échelle d'une communauté, parfois sur une longue période de temps et à partir d'autres arguments que les seuls résultats d'une expérience ; la situation-problème, choisie pour susciter l'étonnement et la curiosité des élèves devant un phénomène imprévu, ainsi que les hypothèses ne ressemblent pas aux problèmes et aux hypothèses scientifiques, téléguidés par un cadre théorique et partagé uniquement par les membres de la communauté qui adhère à la théorie en question.

Dans la section suivante, nous continuons d'explorer la transposition didactique de la démarche hypothético-déductive en développant la manière dont l'idée d'« hypothèse » a été influencée par certains courants de la psychologie cognitive, vers l'idée de « conceptions » ou de « représentations » initiales, de « modèles mentaux alternatifs » ou de « théories naïves de la physique ».

2.1.2.3 Les structures de recherche et leur transposition

Historiquement, les points de vue précédents (inductivisme, méthode hypothético-déductive) étaient souvent défendus par les scientifiques eux-mêmes, dans une tentative de valorisation de leurs propres résultats, d'une part ou de spécification des produits de l'activité scientifique par rapport aux autres œuvres culturelles humaines, d'autre part. C'est le problème classique de la démarcation : quels sont les critères rationnels qui permettent de distinguer la science de la non-science ?

Lorsque les historiens des sciences, les épistémologues et les sociologues des sciences se sont emparés de ces questionnements au début du 20^{ième} siècle, cette prescription de la « bonne » logique de la découverte scientifique a cédé sa place à des analyses beaucoup plus descriptives.

L'avancée majeure introduite par ces nouveaux « penseurs des sciences » a trait à l'idée que les théories s'insèrent au sein d'une structure plus vaste qui définit un consensus général partagé à l'échelle d'une communauté de recherche. Ce sont les notions de « paradigme » chez Kuhn ou encore de « programme de recherche » chez Lakatos.

Définition des programmes de recherche par Lakatos

Selon Lakatos (1994), un programme de recherche est une structure qui permet de rendre compte du développement des théories scientifiques et d'expliquer leur évolution. Il est composé de quatre éléments :

- Le noyau dur est formé de « quelques hypothèses théoriques très générales ». Il est considéré comme infalsifiable, c'est-à-dire qu'il ne peut pas être remis en question : « tout savant qui effectue une modification du noyau dur choisit de sortir du programme de recherche en question » (Chalmers, 1976/1982, p. 136). De plus, « toute inadéquation entre un programme de recherche et les données d'observation est à attribuer, non pas aux hypothèses qui en constituent le noyau dur, mais à toute autre partie de la structure théorique » (Chalmers, 1974/1982, p. 137).
- La ceinture protectrice, en constante évolution, comprend les énoncés d'observation, les hypothèses auxiliaires explicites complétant le noyau dur et les hypothèses sous-jacentes à la description des conditions initiales.
- L'heuristique négative et l'heuristique positive constituent les contraintes méthodologiques d'un programme de recherche. L'heuristique négative est « l'exigence de maintenir inchangé et intact le noyau dur au cours du développement du programme » (Chalmers, 1976/1982, p. 137). L'heuristique positive est constituée des « lignes de conduite générale qui sont des directions de développement du programme de recherche » (Chalmers, 1976/1982, p. 137). Elle indique comment développer la ceinture protectrice afin d'être à même d'expliquer et de prédire des phénomènes réels.

Pour être considéré comme scientifique, un programme de recherche doit « conduire à la découverte de phénomènes nouveaux, au moins occasionnellement » (Chalmers, 1976/1982, p. 142). La difficulté de Lakatos pour trouver des critères rationnels permettant de choisir entre des programmes de recherche rivaux a conduit à des critiques virulentes de la part de certains philosophes des sciences, en particulier Feyerabend qui a qualifié la méthodologie de Lakatos d'« ornement verbal » (Feyerabend cité par Chalmers, 1976/1982, p. 147).

Définition des paradigmes de recherche par Kuhn

Dans une perspective moins rationaliste et objectiviste du progrès scientifique mais beaucoup plus axée sur les caractéristiques sociologiques des communautés scientifiques, Kuhn (1962) a également développé une conception du développement et de l'évolution des théories scientifiques en termes de globalités structurées appelées « paradigme ».

Un paradigme est l'ensemble des éléments qui font consensus au sein d'une communauté scientifique. Il est fait « des lois et des hypothèses théoriques explicitement énoncées », « des moyens standards d'appliquer les lois fondamentales à une grande diversité de situations »,

« [de] l'instrumentation et [des] techniques expérimentales nécessaires pour que les lois du paradigme s'appliquent au monde réel » et de « quelques principes métaphysiques très généraux qui guident le travail à l'intérieur d'un paradigme » (Chalmers, 1976/1982). En résumé, un paradigme inclut des contenus théoriques, un savoir-faire théorique et pratique et un ensemble de normes de la recherche scientifique. Selon Kuhn, la formation scientifique a pour fonction de faire acquérir à l'étudiant une maîtrise de l'ensemble des éléments du paradigme :

« en résolvant des problèmes standard, en effectuant des expériences standard et éventuellement en pratiquant une recherche sous la direction de quelqu'un qui est déjà un praticien expérimenté à l'intérieur d'un paradigme donné, un aspirant scientifique se familiarise avec les méthodes, les techniques et les standards de ce paradigme » (Chalmers, 1976/1982, p. 156)

Les scientifiques qui se situent à l'intérieur d'un paradigme donné pratiquent la « science normale », c'est-à-dire qu'ils mènent l'activité consistant à résoudre des énigmes, tant théoriques qu'expérimentales, dictées par les contraintes du paradigme considéré : « les hommes de science normale formulent et étendent le paradigme dans le but de rendre compte et d'intégrer le comportement de certains éléments pertinents du monde réel » (Chalmers, 1976/1982, p.151). Lorsque certaines énigmes non résolues (les « anomalies ») sont considérées comme particulièrement préoccupantes, le paradigme considéré rentre en crise et un paradigme rival est susceptible d'apparaître. Celui-ci est d'une nature incompatible avec l'ancien paradigme car « chaque paradigme voit le monde comme constitué de différentes sortes de choses » (Chalmers, 1976/1982, p. 159) : c'est l'incommensurabilité des paradigmes.

La révolution scientifique est la dynamique de transition de l'ancien paradigme vers le nouveau. Deux remarques méritent d'être mises en lumière à ce propos :

- Cette transition n'est pas basée sur des arguments purement logiques, mais fait intervenir dans une large mesure des paramètres sociologique et psychologique : « Il n'y a pas d'argument logiquement contraignant qui dicte à un scientifique d'abandonner un paradigme au profit de l'autre (...). Du point de vue de Kuhn, le type de facteurs qui contribuent dans les faits à faire changer les scientifiques de paradigme est un sujet de recherche psychologique et sociologique » (Chalmers, 1976/1982, p. 162)
- Cette transition est un processus intrinsèquement collectif : « Une révolution scientifique signifie l'abandon d'un paradigme et l'adoption d'un nouveau, non par un savant isolé, mais par la communauté scientifique concernée dans son ensemble » (Chalmers, 1976/1982, p. 162)

Les théories du changement conceptuel

Au niveau transpositif, la conception des structures de recherche et leur évolution au cours du temps a inspiré certains chercheurs en psychologie du développement cognitif et en didactique des sciences, qui ont eux-mêmes eu une influence sur les concepteurs de programmes scolaires.

Certains chercheurs en psychologie du développement cognitif et en didactique des sciences se basent sur l'existence d'un « déjà-là du sens commun » défini comme l'ensemble des perceptions, représentations, idées ou modes de raisonnement que les élèves possèdent a priori à propos de différents phénomènes naturels. Ce déjà-là du sens commun s'est vu donné différentes dénominations (les « conceptions initiales », les « théories naïves », les « modèles alternatifs »), en fonction des caractéristiques qui lui ont été attribuées.

À partir de ce concept, certains d'entre eux (Carey, 1985 ; Vosniadou, 1994 ; Posner, Strike, Hewson & Gertzog, 1982) défendent deux thèses :

- Premièrement, ce « déjà-là du sens commun » possède une certaine structuration interne. Il se présente sous forme d'une large structure théorique dont l'ensemble des éléments forme un système cohérent :

« the presuppositions of the framework theory represent relatively coherent systems of explanation, based on everyday experience and tied to years of confirmation » (Vosniadou, 1994, p. 49).

- Deuxièmement, la transition des « théories naïves » ou « conceptions initiales » portées par les élèves vers les points de vue scientifiques présente des similarités avec l'évolution et le remplacement des structures de recherche tels que les ont décrits Kuhn et Lakatos :

« This [naive] framework theory of physics constrains the process of acquiring knowledge about the physical world in ways analogous to those that research programs and paradigms have been thought to constrain the development of scientific theories (Kuhn, 1977; Lakatos, 1970) » (Vosniadou, 1994, p. 47)

Dans le même ordre d'idée, Posner et ses coauteurs établissent un parallèle entre les changements internes à l'histoire des sciences et les changements se déroulant au sein d'un individu en cours d'apprentissage, ce qui leur permet de proposer des conditions nécessaires à un changement conceptuel (Posner & al. 1982) :

- Les conceptions actuellement utilisées par l'apprenant doivent paraître insatisfaisantes de son point de vue. L'organisation des insatisfactions au sein des conceptions existantes se construit à travers la mise en scène d'anomalies qui doivent permettre de créer des conflits cognitifs :

« Generally, a new conception is unlikely to displace an old one, unless the old one encounters difficulties (...) that is the individual must first view an existing conception with some dissatisfaction before he will seriously consider a new one. One major source of dissatisfaction is the anomaly. Each time a person unsuccessfully attempts to assimilate an experience or a new conception into his existing network of conceptions, that person experiences an anomaly. (...) If taken seriously by students, anomalies provide the sort of cognitive conflict (like a Kuhnian state of « crisis ») that prepares student's conceptual ecology for an accommodation » (Posner & al., 1982, p. 220-224)

- Une nouvelle conception doit paraître intelligible et plausible : les élèves doivent être en mesure de la comprendre et de l'estimer vraisemblable.
- Une nouvelle conception doit être féconde : elle doit pouvoir suggérer la possibilité de recherches fructueuses.

Décalages entre le schéma d'évolution des structures de recherche (Lakatos et Kuhn) et le schéma d'évolution des conceptions initiales

Avant de nous interroger sur les implications de la théorie du changement conceptuel sur les méthodes d'enseignement des sciences, analysons les écarts majeurs qui existent entre le schéma originel d'évolution des structures de recherche défendu par Kuhn et le schéma d'évolution des conceptions initiales proposé par Posner & al.

Rappelons que selon Kuhn, la transition de l'ancien paradigme vers le nouveau n'est pas fondée sur des arguments logiques mais sur des paramètres sociologiques et psychologiques, d'une part et constitue un processus intrinsèquement collectif, d'autre part. En totale opposition avec ces deux principes, Posner & al. défendent une vision rationaliste et individuelle de l'apprentissage :

« Teaching science involves providing a rational basis for a conceptual change. We have also seen that fundamental conceptual changes, termed accommodations, may involve changes in one's fundamental assumptions about the world, about knowledge and about knowing and that such changes can be strenuous and potentially threatening, particularly when the individual is firmly committed to prior assumptions » (p. 223).

Les modifications subies par rapport aux modèles princeps nous permettent d'affirmer que, contrairement aux deux cas précédents (méthode inductive et hypothético-déductive), les résultats de la philosophie des sciences constituent davantage une source d'inspiration pour une théorie cognitive de l'apprentissage des sciences plutôt qu'un modèle à suivre rigoureusement afin de transposer au plus près des pratiques scientifiques authentiques dans les classes.

Quelle est la place de la théorie du changement conceptuel dans les classes ?

Cette théorie cognitive de l'apprentissage des sciences a donné lieu à de nombreuses stratégies d'enseignement centrées sur le changement conceptuel (par exemple, l'apprentissage par objectif-obstacle, cf. Martinand, 1986) : ces stratégies s'articulent autour de l'identification et la clarification des « conceptions » des élèves à propos d'un thème d'enseignement particulier, d'une part puis de leur remise en question à l'aide de contre-exemples (les anomalies dans le langage de Posner et al.) ou de débats argumentés entre pairs, d'autre part. Le conflit (socio)cognitif y devient le moteur indispensable de l'apprentissage.

Dans le même ordre d'idée, une autre tendance a rencontré beaucoup de succès : il s'agit de l'hybridation de la méthode hypothético-déductive décrite dans le paragraphe précédent avec certains aspects de la théorie du changement conceptuel (Halloun & Hestenes, 1985 ; Vosniadou, 1994 ; dans le monde francophone, Johsua & Dupin, 1989). Halloun & Hestenes affirment en 1985 :

« [Misconceptions] should be regarded as serious alternative hypotheses to be evaluated by scientific procedures. This would provide students with sound reasons for modifying their beliefs beyond the mere authority of teacher and textbook » (p. 1).

Vosniadou surenchérit en 1994 :

« The presuppositions and beliefs of the [students'] naive theories are hypotheses that can be subjected to experimentation and falsification » (p. 67).

Dans le cadre de la démarche hypothético-déductive, les hypothèses des élèves se font alors les reflets de leurs « conceptions initiales » ou « théories naïves » et c'est leur invalidation à travers la conception et la réalisation d'une (ou plusieurs) expérience(s) cruciale(s) qui fait office d'anomalie(s) et qui crée le conflit cognitif désiré. Comme le souligne Gyllenpalm & Wickman dans une posture critique (2011) : « Somewhere along the way, the notion of hypothesis seems to have been hijacked as a tool for eliciting students' prior ideas and setting the stage for a cognitive conflict to occur » (p. 2009).

Astolfi (1992a) donne un exemple détaillé de ce genre de démarche sur le thème de l'évaporation au CP :

« Une fois que les enfants ont manipulé et ont vu sécher les cheveux de la poupée, elle [l'enseignante] fait insensiblement évoluer le type de questionnement, passant d'une activité ludique à une activité de nature plus scientifique. Elle pose alors une question du type : "Que devient l'eau, quand on sèche les cheveux de la poupée ? " Les élèves ne commencent pas par dire, comme elle l'espérait, que l'eau est passée dans l'air par évaporation, mais plutôt : "Elle est passée dans la tête de la poupée". Après avoir pu concrètement vérifier que ce n'est pas le cas, ils proposent une seconde idée : "Si elle n'est pas passée dans la tête de la poupée, elle est passée dans le sèche-cheveux." Un rapide démontage infirme aussi cette seconde idée. (...) La deuxième réponse fait d'ailleurs rétroactivement comprendre la manière dont les élèves ont pu penser la première. Car si leur seconde hypothèse semble indiquer que le sèche-cheveux fonctionne à la manière d'un aspirateur, la première (étrange et inattendue) peut mieux se comprendre comme un fonctionnement du sèche-cheveux par refoulement d'air : l'air chaud sortant « sous pression » pousse l'eau au-delà des cheveux de la poupée, et la faire pénétrer à l'intérieur de la tête » (p. 110).

On voit ici comment les conceptions des élèves (l'eau est passée dans la tête de la poupée, l'eau est dans le sèche-cheveux) sont considérées comme des hypothèses vérifiables, qui induisent des protocoles expérimentaux d'invalidation (vérifier la tête, démonter le sèche-cheveux). Le résultat de ces tests paraît univoque et indiscutable : il est censé provoquer l'adhésion de élèves, et par là, le conflit cognitif qui libère des conceptions erronées. L'idée d'hypothèse, synonyme de « conception initiale », dérive encore un peu plus de son usage dans la pratique scientifique, où, rappelons-le, elle est sous-tendue par un cadre théorique.

Dans le dernier paragraphe de ce chapitre, nous nous positionnerons sur certains aspects de ces études.

2.1.2.4 L'anarchisme épistémologique et sa transposition

Définition de l'anarchisme épistémologique

Dans son ouvrage polémique *Contre la méthode* (1979), Feyerabend fustige avec virulence l'idée d'une méthode unique basée sur des principes rigides et immuables et met au contraire en lumière la panoplie méthodologique diversifiée effectivement à l'œuvre dans la progression scientifique à travers l'étude du développement de la théorie galiléenne. Par conséquent, il se refuse à prescrire une quelconque « recette » méthodologique et propose à la place un pluralisme de méthodes (d'où la célèbre formule « anything goes ») : la science progresse mieux par la multiplication de théories et de méthodologies rivales qu'il convient donc de faire proliférer, y compris par des biais incongrus tel l'anti-inductivisme (défendre un modèle qui *s'oppose* à un ensemble de faits connus). Il défend l'idée que l'enfermement méthodologique est dommageable au développement des sciences.

Mais, s'il n'existe pas de méthode unique, c'est le bien-fondé du champ scientifique tout entier qui doit être questionné :

« la science n'offre d'ailleurs qu'une unité de façade et il suffit pour le comprendre de comparer la vision du monde produite par la biologie moléculaire qui incline au réalisme, et celle qui se dégage de la mécanique quantique où les découvertes dépendent lourdement des procédures : "ce monstre unique, LA SCIENCE, qui parle d'une seule voix, est un montage construit par des propagandistes, des réductionnistes et des éducateurs." (Feyerabend, 2014, p. 81). À cette conception d'une science monolithique et parlant d'une seule voix, Feyerabend substitue un refus de la systématisation, voire de la généralisation. La pluralité est partout, jusque dans la philosophie des sciences, devenue "un tas assez chaotique d'opinions et d'approches" où l'on rencontre, pêle-mêle, les kuhniens, poppériens, et autres foucaaldiens » (Hoquet, 2015)

À partir de là, Feyerabend s'emploie sans relâche à déboulonner la légitimité de la science notamment en s'en prenant aux trois catégories de la philosophie classique : la vérité, la rationalité, l'objectivité. Dans un relativisme assumé, Feyerabend va jusqu'à affirmer que science et mythe ne peuvent pas être distingués.

La transposition de l'anarchisme épistémologique

Les sept briques élémentaires de la nature des sciences (Lederman)

Au niveau transpositif, l'anarchisme épistémologique de Feyerabend a fait des émules : Lederman (2004) part du postulat que « no consensus presently exists among philosophers of science, historians of science, and science educators on a specific definition for NOS [Nature of Science] » (p. 303).

Lederman, Abd-El-Khalick, Bell et Schwartz (2002, p. 499) proposent de baser un enseignement d'épistémologie des sciences sur plusieurs briques élémentaires qui constitueraient les plus petits dénominateurs communs à tous les penseurs des sciences (philosophes, historiens, sociologues). Les sept briques élémentaires retenues par Lederman et

ses coauteurs sont également censées être accessibles au public de l'école obligatoire, d'une part et utiles à connaître pour les (futurs) citoyens, d'autre part :

- La science est au moins partiellement basée sur des observations du monde naturel ; à un moment ou un autre, la validité des affirmations scientifiques se règle en faisant référence aux faits empiriques (Lederman & al., 2002, p. 499).
- Les produits des sciences sont les théories scientifiques et les lois (Lederman & al., 2002, p. 500).
- La science implique la construction d'entités théoriques et d'hypothèses explicatives, ce qui nécessite beaucoup de créativité de la part des scientifiques (Lederman & al., 2002, p. 500).
- Les engagements théoriques des scientifiques influencent leur travail. Ceux-ci contribuent à former un cadrage qui contraint les problèmes sur lesquels les scientifiques se penchent, la manière dont ils mènent leurs enquêtes, ce qu'ils observent (et n'observent pas) et comment ils interprètent leurs observations (Lederman & al., 2002, p. 500).
- La science affecte et est affectée par les divers éléments de la culture dans laquelle elle est ancrée. Ces éléments incluent, sans toutefois s'y limiter, les structures de pouvoir, la politique, les facteurs socio-économiques, la philosophie et la religion (Lederman & al., 2002, p. 501).
- Le mythe de la méthode scientifique se manifeste régulièrement par la conviction qu'il existe une procédure par étapes, utilisée par tous les scientifiques lorsqu'ils construisent des savoirs scientifiques. Cette notion a été explicitement démystifiée : il n'existe pas de méthode scientifique unique garantissant le développement de connaissances infaillibles (Lederman & al., 2002, p. 501).
- Les savoirs scientifiques sont provisoires, par nature. Bien que fiables et durables, ils ne sont jamais absolus ni certains (Lederman & al., 2002, p. 502)

Cette vision consensuelle, qui a peu percolé chez les didacticiens des sciences francophones (à quelques exceptions près, notamment Pélissier & Venturini, 2016) choisit, pour réconcilier les points de vue diamétralement opposés de certains courants épistémologiques, de sélectionner quelques éléments disjoints qui ne visent pas à reconstituer le « puzzle » global du fonctionnement des sciences.

Les disciplines scientifiques : un air de famille

Arguant du fait que la vision proposée par Lederman & al (2002) passe sous silence la nature systémique des sciences, Irzik & Nola (2011) en proposent une alternative. Selon ces auteurs, il n'existe pas d'ensemble de conditions nécessaires et suffisantes susceptible de déterminer la signification d'une « science expérimentale ». Pour arriver à regrouper sous un même chapeau des disciplines aussi différentes que la zoologie ou l'archéologie, Irzik & Nola recourent à la notion wittgensteinienne d'« air de famille » : cette idée repose sur le fait que chaque membre d'une même famille possède certains traits similaires à certains autres membres de la famille

(mais pas à tous), tout en sachant que l'ensemble des traits est spécifique d'une famille particulière. Similairement, si l'on considère la liste exhaustive des caractéristiques de la famille « science expérimentale », chaque discipline scientifique en possède toujours un certain nombre, qui se recoupe partiellement avec toutes les autres disciplines. Les caractéristiques se réfèrent aux domaines des activités (planifier et mener à bien des expérimentations, formuler des questions ou problèmes, etc.), des buts ou valeurs (prévoir, expliquer, atteindre une certaine adéquation empirique, la vérité, la simplicité, etc.), des règles méthodologiques (construire des hypothèses ou modèles vérifiables, éviter les ajouts ad-hoc aux théories, conduire des études randomisées en double aveugle, etc.) ou des résultats (théories, lois, modèles, hypothèses, etc.). Selon Irzik & Nola (2011), cette approche permettrait de dresser un tableau complet du fonctionnement des sciences expérimentales, sans imposer une méthode unique à toutes les disciplines.

Conclusion

En résumé, la volonté d'introduire des éléments d'épistémologie dans l'enseignement des sciences, tout en prenant en compte l'absence d'une méthodologie unique (Feyerabend, 1979) débouche sur deux stratégies en tension l'une avec l'autre : dresser la liste exhaustive de toutes les caractéristiques propres aux sciences expérimentales, chaque discipline piochant à sa guise dans la liste (approche de l'« air de famille » ; Irzik & Nola , 2011) vs circonscrire l'étude aux caractéristiques issues d'un accord minimal entre tous les courants de l'épistémologie (approche du consensus ; Lederman & al., 2002).

2.1.3 Conclusion

Cette analyse nous conduit à proposer un modèle en deux parties des sources d'influences possibles dans l'élaboration des curriculums au sein de la communauté francophone. Ce modèle distingue les références épistémologiques d'une part et les références didactiques d'autre part.

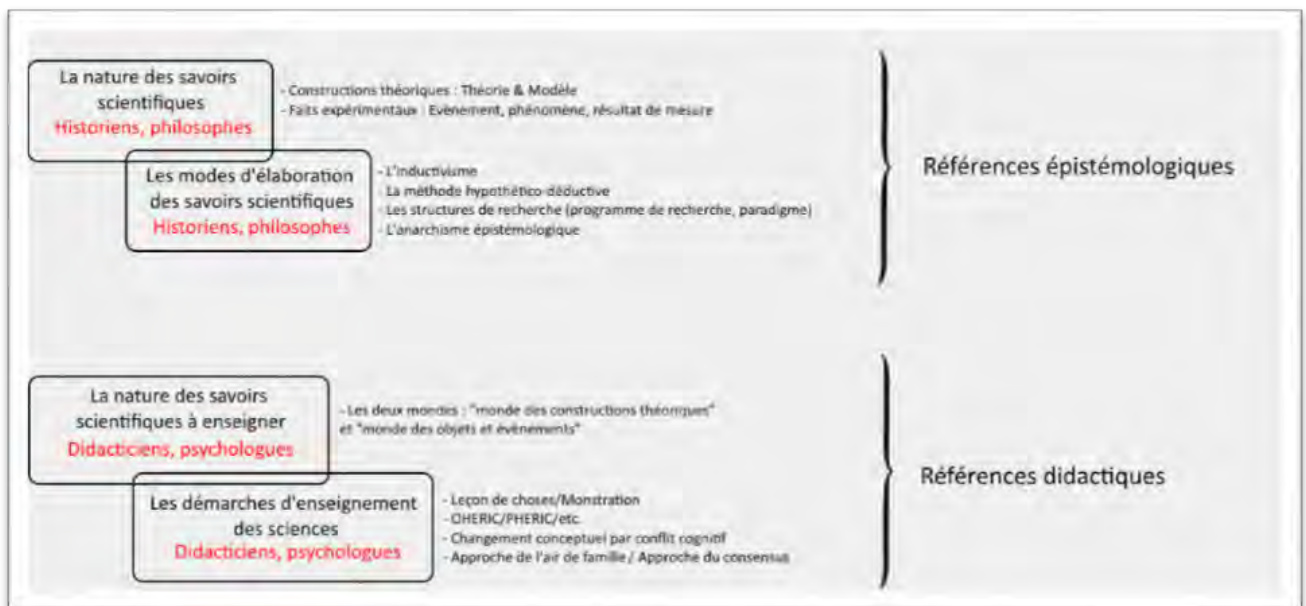


Figure 5 : Les références épistémologiques et didactiques pour l'enseignement des sciences à l'école obligatoire

Ce qu'il importe de retenir de ce modèle, c'est que les manières de construire des savoirs dans les pratiques scientifiques telles qu'elles sont décrites par les philosophes, historiens et sociologues constituent des sources d'inspiration pour la re-construction de ces mêmes savoirs dans la classe. La leçon de choses et la monstration qui s'inspirent de l'inductivisme, les multiples démarches d'inspiration hypothético-déductive, la théorie du changement conceptuel qui tire son origine de l'évolution des paradigmes de recherche selon Kuhn, l'approche du consensus/de l'air de famille qui prennent en compte l'absence d'une méthodologie unique sont des références didactiques possibles pour les rédacteurs des textes prescriptifs qui partagent l'idée que les savoirs scientifiques peuvent s'apprendre à l'école selon des procédures analogues à celles de la production des savoirs au sein des communautés scientifiques.

À chacune des étapes du processus de transposition, des décalages creusent l'écart entre les démarches des scientifiques et les démarches en classe de sciences. Nous en avons répertorié quelques-uns : le scientifique, contrairement à ce que défend l'inductivisme, ne démarre pas son travail par une récolte systématique de faits ; le problème, dans le contexte de la situation-problème, ne se superpose pas au problème scientifique ; les hypothèses, en classe de sciences, ne ressemblent pas aux hypothèses savantes ; le basculement d'une conception naïve vers une conception scientifique n'est pas équivalent au changement d'un paradigme vers un autre, etc.

Ces considérations impliquent l'usage de précautions liées au discours quand on décrit les pratiques d'enseignement et d'apprentissage : quand nous disons qu'un enseignant engage ses élèves dans une démarche hypothético-déductive, fait-on référence à une démarche du même type que celle développée par Claude Bernard (avec des hypothèses et un problème ancrés dans un cadre théorique) ou parle-t-on de celle promue par les programmes français du collège (car l'enseignant suit bien un canevas en sept étapes dont l'une se dénomme « production d'hypothèses ») ? Quand nous affirmons qu'un enseignant affiche une conception inductiviste de l'enseignement des sciences, voulons-nous dire qu'il estime que les données brutes « parlent » d'elles-mêmes ou a-t-il aménagé une expérience de manière à mettre en valeur ses traits pertinents (inductivisme par monstration) ? Les décalages mis en lumière ci-dessus nous interdisent de considérer que les différentes versions de l'inductivisme, de la démarche hypothético-déductive, etc. sont réductibles l'une à l'autre : il s'agit d'employer des expressions qui permettent de les discerner, d'autant plus si on s'attache à prendre en compte leurs conséquences sur la dynamique de co-construction des savoirs.

2.2 Quelques savoirs épistémologiques et didactiques relatifs à l'enseignement des propriétés de la matière

Dans cette seconde partie, nous nous intéressons à des études spécifiquement associées à l'enseignement des trois états de la matière (solide, liquide, gaz) et des changements d'état de l'eau faisant intervenir l'état gazeux (évaporation, ébullition, condensation). Trois perspectives sont particulièrement abordées : les études piagétienne qui se penchent sur la conservation ou non-conservation de la matière du point de vue des enfants lors d'opérations de partition et de déformation ; une récapitulation des résultats des études qui visent à lister les « conceptions initiales » des enfants sur les états et les changements d'état de l'eau ; les stratégies

d'enseignement à propos des modèles particuliers spécialement développés au sein de la communauté des didacticiens francophones dans les années 90.

2.2.1 Les études piagésiennes sur la (non)-conservation de la matière

À partir des années 1920, Piaget et ses collaborateurs initient les premiers travaux d'investigation des idées des sujets épistémiques à propos des propriétés de la matière. Ces travaux s'intéressent à la genèse de la pensée logique : selon Piaget, l'individu passe par plusieurs stades cognitifs de développement, atteints à travers des processus d'assimilation et d'accommodation, qui permettent une adaptation croissante du sujet à son environnement. Piaget et Inhelder (1941) ont d'abord étudié les représentations des sujets à propos de la conservation de grandeurs physiques simples (la quantité de matière, le volume et la masse pour les liquides et les solides) lors d'opérations de partition et de déformation, de transvasement et de dilution : par exemple, on demande au sujet de se prononcer sur la conservation ou la non-conservation de la quantité de matière, de la masse et du volume d'une boulette d'argile que l'on a allongé, rétréci ou sectionné en parties plus petites ou bien sur celle d'un morceau de sucre dissous dans l'eau, ou bien encore sur celle d'un liquide transvasé d'un récipient haut et étroit dans un récipient bas et large.

La théorie piagésienne permet alors de repérer des stades de développement : entre quatre et six ans, l'enfant vit dans un « monde sans invariance quantitative ». Dans cette période « pré-opératoire », le sujet soutient la non-conservation de la quantité de matière, de la masse et du volume dans toutes les situations précédentes, à l'aide d'arguments divers. Ce n'est qu'un peu plus tard qu'il atteint « le stade des opérations concrètes » dans lequel il admet successivement la conservation de la matière, la conservation du poids, et enfin la conservation du volume. Lors du stade des opérations concrètes, c'est l'articulation raisonnée de certains indices perceptifs qui permet de décider de la conservation. Autrement dit, la conservation apparaît comme une nécessité de type logique et se base sur trois familles d'arguments : des arguments d'identité (s'il n'y a ni ajout ni retrait de matière, donc elle se conserve), de réversibilité (la transformation inverse permet de revenir à l'état initial) et de compensation (le volume de liquide se conserve car la surface du récipient qui augmente compense le niveau qui diminue).

2.2.2 Les études des conceptions et du changement conceptuel

À partir des années 1980, dans la mouvance théorique initiée par Posner & al. (1982) et inspirée par la logique de l'évolution des structures de recherche telle que développée par certains philosophes des sciences (Kuhn, Lakatos), d'une part et l'approche développementale de Piaget, d'autre part, de nombreux chercheurs ont cherché à recueillir les conceptions des élèves à propos des états de la matière et des changements d'état de l'eau.

2.2.2.1 Les états de la matière

Les conceptions des enfants concernant les états solide, liquide et gazeux ont été repertoriées dans de nombreuses études (Lee, Eichinger, Anderson, Berkheimer & Blakeslee, 1993 ; Johnson, 1998a, 1998b ; Krnel, Watson & Glazar, 1998 ; Stavy & Stachel, 1985 ; Stavy, 1990 ; Séré & Tiberghien, 1989 ; Séré & Weil-Barais, 1988).

Les liquides et les solides

Selon les enfants, chacun des trois états est associé à des propriétés particulières et surtout à des types d'action que les objets sous l'état considéré sont susceptibles de subir. Ainsi, les solides sont lourds, durs et rigides. Ils ont la capacité d'être tenus, d'être déplacés en bloc, de se casser s'ils tombent. Les liquides sont mouillés. Ils ont la capacité d'être versés, d'être transférés, de couler, de s'écouler, de courir (comme un cours d'eau). Tous les liquides ressemblent à l'eau, qui fait office de prototype de l'état liquide. Ces conceptions entraînent des catégorisations correctes pour certains objets, par exemple les solides durs et rigides, comme les métaux. D'autres objets posent davantage de problèmes aux enfants :

- Certains solides sont classifiés à mauvais escient dans la catégorie des liquides. Il s'agit des objets mous, malléables, poudreux, qui n'ont pas de forme propre (tels la pâte à modeler, le sucre). Des études statistiques montrent qu'une grande partie des enfants de douze ans ne parvient pas à classifier de façon adéquate les objets mous et les poudres (Stavy & Stachel, 1985) ; certains enfants inventent une nouvelle catégorie, intermédiaire entre solides et liquides, à propos des poudres, ce qui n'a rien d'étonnant puisque les poudres n'adoptent pas le comportement attendu des solides (elles ne peuvent pas être déplacées en bloc) tout en exhibant certaines des propriétés des liquides (elles s'écoulent entre les doigts). Enfin, les solides qui fondent rapidement, comme la glace, sont rarement catégorisés correctement : il semblerait que la rigidité soit perçue comme une propriété intrinsèque, et donc, interchangeable des solides et que si un objet est susceptible de perdre sa rigidité, il ne puisse pas être perçu comme un solide.
- Certains liquides sont classifiés de manière inappropriée dans la catégorie des solides. Il s'agit des liquides très visqueux (comme le miel) qui ont un taux d'écoulement très supérieur à celui de l'eau, liquide de référence. Les liquides colorés et/ou opaques (comme le lait) voient également leur statut remis en question.

Enfin, un large nombre d'enfants, quel que soit leur âge, relie le concept de solide avec celui de poids : la glace est, par exemple, perçue comme plus pesante que l'eau liquide dont elle est issue (Krnél & al., 1998).

Les gaz

En ce qui concerne l'état gazeux, les enfants considèrent cet état comme le plus mystérieux des trois et ont des difficultés à assimiler qu'il s'agit d'une substance matérielle. Cette conception va logiquement de pair avec celle, soutenue également par les enfants, qu'une substance matérielle est ce qui peut être vu ou touché. Les gaz sont considérés comme des substances dangereuses et combustibles, probablement en référence à l'utilisation familière de chauffage du gaz de ville. Tous les gaz ressemblent à l'air, qui fait office de prototype de l'état gazeux. Cependant, la présence d'air dans notre environnement est rarement reconnue : « Only 30% of five to seven-year-old children think that the air is all around and this increases with age to 77% in nine to 11-year-old children » (Krnél & al., 1998, p. 268). L'air est encore moins bien appréhendé quand il est placé dans un contenant : « Only 22% of five to seven-year-olds said that a container was filled with air, while the rest claimed the opposite » (Krnél & al., 1998, p.

268). De plus, l'air est relié à la propriété de souffler, ce qui explique la difficulté des enfants à reconnaître l'air quand il n'est pas en mouvement : « Pour beaucoup d'élèves au début de la 6^{ème}, l'air immobile n'existe pas réellement. Seul le vent, les courants d'air ont une réalité et sont de l'air » (Séré & Tiberghien, 1989, p. 915). Les difficultés ne s'arrêtent pas quand l'air parvient à être perçu : il est possible qu'il ne soit pas assimilé à un gaz ou au contraire qu'il soit rendu synonyme avec la notion de gaz. Dans ce dernier cas, le fait qu'il existe une variété importante de gaz avec des propriétés spécifiques n'est pas assimilé : c'est le statut unificateur (d'un ordre supérieur) du concept de gaz qui est remis en question. D'autre part, les enfants éprouvent des difficultés à attribuer un poids à l'air :

« Avant enseignement moins de la moitié des élèves (40%) pensent qu'un ballon de football s'alourdit quand on le gonfle. On peut encore compter 17% d'élèves qui pensent qu'un ballon, une fois gonflé, est plus léger. Pour eux du moins, l'air a une action sur la balance, contrairement à tous ceux qui pensent que l'air "ça ne pèse rien, ça ne se pèse pas". Ces conceptions peuvent cohabiter avec une connaissance qu'on est tenté de qualifier de stéréotype : l'air chaud est léger » (Séré & Tiberghien, 1989, p. 916)

Enfin, il est important de noter que les termes « vapeur », « brouillard », « gaz », « air », « fumée », « buée » sont utilisés de manière assez flexible voire interchangeable par les élèves, reflétant leur emploi dans la vie quotidienne.

Dans une lignée très piagétienne, Séré & Weil-Barais (1988) ont imaginé des tests qui permettent de conclure sur les idées des enfants à propos de l'invariance de la quantité de matière lorsque l'état physique considéré est l'état gazeux. Elles ont proposé à des enfants de statuer sur la conservation ou non-conservation d'une certaine quantité d'air placée dans des contenants fermés quand ceux-ci subissent des modifications de volume, de température ou de pression. Il s'avère que beaucoup d'enfants effectuent des confusions entre ces grandeurs, en imaginant par exemple que si le contenant diminue de volume, la quantité d'air qu'il contient diminue aussi. La conservation de la matière quand elle est sous forme gazeuse paraît donc non acquise au niveau du secondaire inférieur.

L'eau liquide, la glace et la vapeur d'eau

Les différences perceptives et de vocabulaire incitent les enfants à penser que la glace, l'eau et la vapeur sont trois substances différentes. Plus généralement, d'après Johnson (1998a) : « Crucially, one must appreciate that the identity of a substance is independent of state and so a substance could be in any of the three physical states » (p. 567).

Il ajoute plus loin : « The changes involving the gas state were far more problematic for the pupils » (p. 567). Ce sont ces transformations que nous étudions dans la suite.

2.2.2.2 Les changements d'état

Les conceptions des enfants concernant les changements d'état faisant intervenir l'état gazeux (évaporation, condensation, ébullition) ont été répertoriées dans de nombreuses études (Osborne & Cosgrove, 1983 ; Lee & al., 1993 ; Johnson, 1998a, 1998b ; Bar & Galili, 1994 ; Bar & Travis, 1991 ; Paik, 2015 ; Séré & Tiberghien, 1989 ; Coştu & Ayas, 2005 ; Tytler,

2000 ; Prain, Tytler & Peterson, 2009 ; Tytler & Peterson, 2001 ; Holgersson & Löfgren, 2004 ; Laval, 1985).

L'évaporation

Ces études nous conduisent à établir la typologie suivante des conceptions des enfants à propos de l'interprétation du phénomène d'évaporation :

- E1 - les conceptions qui établissent une description factuelle des événements : « l'eau sèche » ou bien « l'eau disparaît ».
- E2 - les conceptions qui se limitent à inclure le terme « évaporation », sans élaborer davantage : « l'eau s'évapore ».
- E3 - les conceptions qui comportent des déclarations causales ou associatives faisant office d'explication : « la flaque sèche à cause du choc thermique entre le soleil chaud et l'eau froide » ou bien « l'eau se dissout à l'intérieur des vêtements ».
- E4 - les conceptions qui prônent un déplacement ou un changement de position de l'eau mais en s'abstenant de se prononcer sur une modification de forme ou d'état physique de l'eau. Deux sous-catégories de conceptions composent ce groupe : celles qui mentionnent l'absorption de l'eau par le support ou le contenant (« chaque goutte d'eau est absorbé par le sol, l'une après l'autre » ou « l'eau imbibe le verre, comme une éponge ») et celles qui mentionnent un déplacement vers le haut, en faisant parfois référence à des éléments de savoir du cycle de l'eau (« l'eau s'en va dans l'air, dans l'atmosphère, dans le ciel, au plafond, dans les nuages, dans le soleil » ou « l'eau va former la pluie »).
- E5 - les conceptions qui attribuent à l'eau un changement de forme ou d'état physique, que ce changement aboutisse à une forme perceptible (« l'eau se transforme en brouillard, en buée ») ou à une forme imperceptible (« l'eau devient de la vapeur » ou « l'eau devient de l'air »).

D'autres conceptions ont été mises en lumière : certains enfants pensent que le chauffage (par le Soleil ou une autre source de chaleur) est indispensable au phénomène d'évaporation ; d'autres estiment qu'il est nécessaire qu'il existe une différence de température entre le liquide et son environnement ; d'autres encore perçoivent l'évaporation comme un phénomène se produisant dans tout le volume du liquide. Enfin, certains enfants considèrent que l'évaporation est le résultat de la décomposition des molécules d'eau en hydrogène et oxygène, et donc, que les gaz correspondants sont produits et s'échappent vers l'atmosphère.

La condensation

À propos de la condensation, la majorité des travaux se sont concentrés sur l'interprétation que les enfants proposent par rapport aux gouttelettes d'eau qui apparaissent sur les parois extérieures d'un verre, sorti du réfrigérateur ou bien rempli de glaçons. Les recherches font apparaître une typologie de ces conceptions :

- C1 - les conceptions qui établissent une description factuelle des événements : « il y a des petites gouttes d'eau sur le verre ».

- C2 - les conceptions qui comportent des déclarations causales ou associatives faisant office d'explication : « le verre est froid donc ça fait apparaître des gouttes d'eau de l'autre côté ».
- C3 - les conceptions qui défendent un déplacement de l'eau de l'intérieur du verre vers ses parois extérieures: « l'eau traverse le verre » ou « l'eau passe de l'intérieur à l'extérieur ».
- C4 - les conceptions qui font état d'une confusion entre la matière et l'énergie : « le froid a traversé le verre et a produit de l'eau », « l'eau a été fabriquée par le froid » ou « l'air sec et la surface froide du verre réagissent pour former de l'eau ».
- C5 - les conceptions qui font intervenir l'eau présent dans l'air, que l'état de l'eau soit clairement spécifié (« les petites gouttes sont issues de la vapeur d'eau contenue dans l'air ») ou non spécifié (« l'eau qui est dans l'air se colle au verre »).

Le point nodal des difficultés des enfants se situe dans la reconnaissance de la vapeur d'eau comme étant un des constituants de l'air. Il est très important de remarquer que, du point de vue des enfants, la présence de vapeur d'eau dans l'air n'est jamais une donnée allant de soi, et ce, même s'ils possèdent des connaissances abouties à propos de la transformation inverse, c'est-à-dire l'évaporation. Johnson (1998b) donne un exemple éclairant à ce propos :

« At interview 4, after these pupils had given an account of the evaporation of (...) water, they were then asked again about the condensation, but still could not offer a suggestion by reversing the process. The continuing presence of water vapour in the atmosphere really does seem to present an extra challenge to pupils. The order of questioning did not seem to matter. This does not necessarily mean the pupil thinks the water has been 'annihilated', rather, the pupil just cannot seem to think of it still being there » (p. 705).

Autrement dit, même les enfants qui ont bien assimilé que l'évaporation est la transformation de l'eau liquide en vapeur d'eau ne pensent pas la présence de cette vapeur d'eau dans l'environnement comme un état permanent et ne songe pas à la remobiliser lorsqu'il s'agit de rendre compte de la condensation. Ce même auteur conclut que la compréhension de l'évaporation et celle de la condensation sont intrinsèquement liées : « until one understands both evaporation and condensation it could be argued that one really understands neither » (p. 708).

L'ébullition

D'abord, certaines études (Paik, 2015) rapportent des difficultés des enfants à trouver des critères pertinents pour distinguer l'évaporation de l'ébullition : les enfants pensent souvent que l'ébullition est liée à une augmentation de température, contrairement à l'évaporation. Rares sont ceux qui invoquent la présence de bulles (ébullition) ou son absence (évaporation) ou bien le caractère surfacique (évaporation) ou volumique (ébullition) de la vaporisation considérée.

Au cours de l'expérience d'ébullition de l'eau, les enfants n'ont en général aucun mal pour remarquer les bulles dans l'eau ou le brouillard au-dessus de l'eau bouillonnante (qui résulte de

la condensation de la vapeur qui vient d'être produite) mais utilisent une palette de termes inadéquats pour caractériser le brouillard (« fumée », « vapeur », etc.) et ne font pas forcément le lien entre ces phénomènes et la baisse du niveau de l'eau. Quant aux bulles, plusieurs conceptions d'élèves ont été relevées à propos de leur nature :

- Les bulles sont faites en/de chaleur⁷.
- Les bulles sont constituées d'air, avec parfois un mécanisme explicatif : « en versant l'eau, l'air déjà présent dans le récipient a été emprisonné : ce sont donc des bulles d'air » ou bien « l'eau contient forcément de l'air pour que les poissons puissent respirer d'où les bulles ».
- Les bulles sont constituées d'un mélange d'eau (liquide) et d'air (gazeux).
- Les bulles sont constituées d'oxygène et d'hydrogène.
- Les bulles sont constituées d'eau, l'état de l'eau étant spécifié (vapeur d'eau ou eau à l'état gazeux) ou non.

Des controverses ont vu le jour dans la littérature à propos de la nature du changement d'état faisant intervenir l'état gazeux qui est compris en premier par les enfants (évaporation ou ébullition) : Bar et Galili (1994) défendent l'idée que les enfants s'approprient beaucoup plus précocement le phénomène d'ébullition qui est davantage rapide et spectaculaire que l'évaporation tandis que Johnson (1998b) affirme que la compréhension de ce phénomène par les enfants demeure superficielle pendant longtemps et qu'elle se limite en réalité à l'acceptation d'un transfert de matière de l'eau vers l'air, sans tenir compte du changement d'état subi par l'eau.

De très rares études portent sur la représentation du palier de température, c'est-à-dire la simultanéité de la stabilisation de la température de l'eau et de son ébullition : Laval (1985) relève l'étonnement des enfants :

« L'invariance de la température pendant le changement d'état est un phénomène difficile à admettre - on chauffe et la température ne s'élève plus - la cause et l'effet ne varient plus dans le même sens. Aussi les enfants ont tendance à écarter ce phénomène qui les gêne et à ne pas considérer la transformation en train de s'opérer mais plutôt son résultat » (p. 121)

Séré & Tiberghien (1989) notent que :

« la température de changement d'état dans les cas où il y a chauffage de la substance, est considérée par la majorité des élèves comme la température maximum que cette substance peut atteindre et non comme la température pour laquelle il y a coexistence de deux phases » (p. 922)

Bilan

La majorité des conceptions erronées au sens des auteurs que nous avons cités a été imputée à la difficulté des enfants à appréhender la nature de l'état gazeux, passage incontournable mais

⁷ Traduction de « the bubbles are made of heat »

difficilement franchissable pour l'apprentissage des changements d'état faisant intervenir les gaz. Les enfants ont également tendance à considérer chaque changement d'état (évaporation, ébullition, condensation) comme indépendant les uns des autres et ont des difficultés à en reconnaître la réversibilité.

2.2.2.3 Les particules et le modèle particulaire de la matière

Les conceptions des enfants concernant les particules et le modèle particulaire de la matière ont été répertoriées dans de nombreuses études (Johnson, 1998a, 1998b, 1998c ; Méheut & Chomat, 1990 ; Brooks, Briggs & Driver, 1984 ; Ben-Zvi, Eylon & Silberstein, 1986 ; Griffiths & Preston, 1992 ; Novick & Nussbaum, 1978).

Une typologie des conceptions a été dégagée et celles-ci se sont avérées assez structurées pour être classifiées en « modèles alternatifs ». Dans la suite, nous nous appuyons particulièrement sur les travaux de Johnson (1998a) qui distingue 4 catégories de « modèles alternatifs » : X, A, B et C.

Dans le modèle X, l'idée de particule n'est pas présente : il s'agit d'un modèle continuiste de la matière. Les études montrent que c'est le modèle le plus familier aux enfants et qu'ils témoignent de profondes difficultés à abandonner ce modèle.

Dans le modèle A, les particules existent mais elles sont insérées au sein d'une substance-support. Les particules sont donc additionnelles à un arrière-plan matériel continu. Il existe différents degrés d'association des particules avec la substance dans laquelle elles se situent (« les particules sont « collées à la substance » ou au contraire « libres de se mouvoir ».) Ce modèle est soutenu par la conception bien répertoriée d'une réticence des enfants à imaginer un espace vide entre les particules : cet espace vide est souvent comblé par de l'air dans les traces écrites des enfants. Il est alors possible d'imaginer que le modèle A constitue une façon de concilier un certain apport de l'enseignement en termes de particules avec un modèle continuiste de la matière.

Dans le modèle B, les particules existent sans aucune matière intermédiaire : elles sont déclarées former l'entièreté de la substance perceptible au niveau macroscopique. Cependant, leurs propriétés ne sont pas conformes à celles du modèle scientifique de référence pour de multiples raisons que nous listons ci-dessous.

- Les particules individuelles sont parfois considérées comme étant de même nature que l'échantillon macroscopique : elles en sont de petits morceaux, tellement petits qu'ils ne se voient pas mais fondamentalement similaires à la substance perceptible.
- Les différences macroscopiques entre les états de la matière résultent de différences microscopiques entre les particules (plutôt qu'entre l'organisation des particules). Nous donnons quelques exemples : les particules de gaz sont dessinées par un cercle, celles de liquide ont des formes irrégulières et celles de solide ont l'apparence d'un carré ou d'un cube. Il a été rapporté plusieurs fois des différences de taille des particules dans les traces écrites des enfants, les particules de gaz étant représentées comme les plus petites et celles de solide comme les plus grandes.

- Les particules conservent à l'échelle individuelle les propriétés observées pour l'échantillon macroscopique. Les particules de gaz/solide/liquide adoptent les propriétés de la substance gazeuse/solide/liquide en termes de couleur, odeur, compressibilité/incompressibilité, conduction électrique, etc. Quand on fait subir des transformations à la substance macroscopique, celles-ci se répercutent sur les particules qui la composent : les particules gonflent quand l'échantillon macroscopique se dilate, elles brûlent lors de sa combustion, les particules de liquide prennent la forme du contenant dans lequel le liquide est placé, etc.

Dans tous les cas, toutes ces déclinaisons passent à côté du point fondamental du modèle scientifique de référence : les propriétés macroscopiques des états de la matière émergent du comportement collectif des particules. Dans ce cadre, il est absurde de s'interroger sur l'état physique, la forme ou la température d'une particule isolée.

Dans le modèle C, les particules existent sans aucune matière intermédiaire : elles sont déclarées former l'entièreté de la substance perceptible au niveau macroscopique. Et enfin, les propriétés macroscopiques (perceptibles à échelle humaine) résultent du comportement collectif des particules. Le modèle C est celui qui se rapproche le plus du modèle scientifique de référence.

2.2.2.4 Les étapes du changement conceptuel

La plupart des recherches citées ci-dessus ne se contentent pas de dresser des listes des conceptions des enfants pour un thème donné mais ont tenté, à travers des études longitudinales et transversales de grande ampleur, de déterminer les étapes du changement conceptuel à travers la description du parcours que les enfants empruntent pour naviguer de conception en conception et ce, en fonction de leur âge. Nous donnons quelques exemples ci-dessous, en gardant en tête qu'il n'y pas de consensus sur ces cheminements conceptuels dans la littérature, d'où notre choix de ne pas nous étendre sur ce point.

Au sujet de l'évaporation et de la condensation, les études montrent que les jeunes enfants sont davantage susceptibles de développer des conceptions de type « description factuelle » ou bien « raisonnement causal ou associatif » (ce qui correspond aux conceptions E1, E2, E3 pour l'évaporation et C1 et C2 pour la condensation dans les typologies ci-dessus) : les jeunes enfants ont donc moins tendance à produire des explications qui prennent en charge la question du devenir et de la conservation de l'eau que les enfants plus âgés. Ces derniers se concentrent davantage sur les changements de forme et/ou d'état de l'eau pour être sûrs d'en assurer une certaine permanence (ce qui correspond à la conception E5 pour l'évaporation et la conception C5 pour la condensation dans les typologies ci-dessus). Dans cette lignée, citons Tytler (2000) :

« For evaporation, the younger children are more likely (but only marginally so) to construct explanations based on just like that or association conceptions which do not place importance on the continuing existence of water. The older children showed a much greater appreciation of the interchange of water with the air, and with changes in form of water » (p. 460).

D'autres auteurs avancent des repères d'âge beaucoup plus précis. Ainsi, Bar et Galili (1994) défendent l'existence d'étapes fixées au sujet de la compréhension de l'évaporation par les enfants de 4 à 13 ans : selon ces auteurs, la conception selon laquelle l'eau disparaît lors de l'évaporation (E1) est dominante parmi les très jeunes enfants. Cette conception laisse la place à celle d'une absorption de l'eau par les surfaces (E4) qui apparaît vers l'âge de 7 ans. À 9 ans, c'est la conception selon laquelle l'eau se déplace vers le haut (vers le ciel, le plafond, l'atmosphère, etc.) qui est majoritaire, en même temps que l'apparition des premières conceptualisations de l'air. Enfin, l'idée que l'eau se disperse dans l'air, en subissant un changement d'état (E5) prédomine chez les enfants de 13 ans. La filiation avec l'épistémologie génétique de Piaget (en particulier, les stages de développement) est explicite dans ces exemples.

Au sujet des modèles particuliers, les études montrent une progression quasi-linéaire avec l'âge du modèle continuité de la matière X vers les modèles particuliers A, B et C, avec parfois des modèles hybrides (AB, BC) qui possèdent des caractéristiques des deux modèles cités. Citons Johnson (1998c) :

« For these pupils, this suggests that the sequence A-B-C may represent stages by which they were coming to terms with the particle theory. (...) Although many pupils remained in the same category for a pair of consecutive interviews, over the longer time span the evidence is that most of the pupils did change in their thinking, and with a considerable number moving to model C » (p. 406)

Au final, la plupart des recherches dépeignent un tableau d'une évolution chronologique des conceptions qui vont des modèles simples et descriptifs adoptés par les jeunes enfants, modèles qui ne se détachent pas de la réalité observable vers les modèles élaborés et abstraits qui postulent l'existence d'entités non perceptibles, modèles préférés des enfants plus âgés.

2.2.2.5 Les pratiques d'enseignement et d'apprentissage : angle mort de la théorie du changement conceptuel

Dans leur grande majorité, la méthodologie des recherches qui sont issues de la théorie du changement conceptuel repose sur des questionnaires et/ou des entretiens : les pratiques d'enseignement et d'apprentissage sont rarement investiguées.

Précisons notre propos. Pour éclairer l'avancée des élèves vers des conceptions de plus en plus élaborées, Tytler (2000) explique :

« These older children have much greater access to the phenomenological language commonly used in relation to evaporation and condensation (moisture, vapour, humidity, evaporation). They showed sufficient familiarity with a range of evaporation and condensation phenomena to indicate the prior formulation of questions concerning the nature of the changes to water these entail. (...) The older children are (...) in a better position to reflect productively on these matters » (p. 464-465).

Mais comment les enfants plus âgés ont-ils acquis ce langage relatif à l'évaporation et la condensation ? Comment la familiarité à cette palette de phénomènes s'est-elle développée ?

N'est-ce là qu'une question d'âge ou peut-on y voir les traces d'un enseignement ? La recherche citée s'arrête au seuil de la recension des conceptions et ne s'aventure pas sur ce terrain de questionnement.

Cette mise de côté est encore plus flagrante à travers l'enseignement de thèmes scientifiques très abstraits (par exemple, les modèles particuliers). Si Johnson (1998c) admet bien que « it seems safe to assume that the specific particle ideas [les modèles A, B et C] were introduced by the teaching units » (p. 406), il ne relie pas les caractéristiques de la séquence d'enseignement en question avec la dynamique de transition d'une conception à l'autre (modèle X, A, B, C) qui constitue le cœur de son article.

Les relations entre les conceptions des enfants et les pratiques d'enseignement et d'apprentissage constituent indubitablement l'angle mort des recherches didactiques sur les changements d'état issues de la théorie du changement conceptuel.

2.2.3 Les stratégies d'enseignement à propos des modèles particuliers

Plusieurs auteurs insistent sur les bénéfices d'introduire un modèle particulier lors de l'enseignement des états de la matière et des changements d'état (Larcher, Chomat & Méheut, 1990 ; Chomat, Larcher & Méheut, 1988 ; Séré, 1992 ; Tytler, Prain & Peterson, 2007 ; Prain & al., 2009 ; Johnson, 1998a ; Papageorgiou & Johnson, 2005 ; Holgersson & Löfgren, 2004) y compris à un âge précoce (Novak & Musonda, 1991). Certains d'entre eux (Johnson, 1998b ; Novak & Musonda, 1991) défendent l'idée que la description macroscopique des phénomènes n'est pas suffisante pour interpréter les changements d'état faisant intervenir l'état gazeux et que le recours à un modèle particulier s'avère indispensable : « Without particulate ideas the notion of the liquid-gas transition cannot be successfully imagined » (Prain & al., 2009). D'autres (Tytler & al., 2007) ajoutent que c'est la multiplicité des représentations disponibles pour un même phénomène qui permet de faire avancer la compréhension conceptuelle des élèves.

Au sein de la communauté des didacticiens francophones, cet axe de recherche s'est beaucoup développé dans les années 90 : plusieurs articles décrivent la structure de séquences d'enseignement qui se fondent sur l'introduction d'un modèle particulier (Larcher & al., 1990 ; Chomat & al., 1988 ; Séré, 1992 ; Genzling, 1988 ; Méheut, 1996). À l'inverse d'une introduction d'un modèle particulier comme limite imaginée d'une division de plus en plus fine de la matière (comme le sable issu de la percussion de cailloux) soutenue par certains auteurs (Holgersson & Löfgren, 2004), les chercheurs francophones défendent une « origine rationnelle plutôt qu'empirique » (Séré, 1992) au modèle particulier : toutes les séquences débutent par l'introduction axiomatique d'un « germe de modèle ». Celui-ci définit la notion de « particule » et donne des informations choisies sur certaines de leurs propriétés : ainsi, dans la séquence de Larcher & al. (1990), le gaz est représenté par « un ensemble de particules ayant les propriétés suivantes : une particule ne se coupe pas, ne se déforme pas, garde les mêmes dimensions, garde la même masse » (p. 54). Séré (1992) propose d'ajouter des propriétés relatives au mouvement :

« Ces petites boules sont sans arrêt en mouvement : on sait même qu'elles décrivent des droites à grande vitesse. Quand l'une d'elles en heurte une autre, elles rebondissent l'une sur l'autre. (...) S'il y a du gaz qui touche [un objet] des deux côtés, il est poussé des deux côtés : c'est le côté où les bombardements sont les plus nombreux qui gagne » (p. 81).

Dans tous les cas, « pour donner un caractère figuratif concret à ce modèle on peut en faire des représentations iconiques (dessins) » (Larcher & al., p. 52). Cette base axiomatique fournie à l'élève en tout début de séquence constitue l'outil pour penser toutes les situations qui lui sont présentées par la suite : expansion ou compression des gaz, dilatation des solides et liquides, transitions de phase. Lorsque l'élève se confronte à ces situations, il applique et met à l'épreuve le « germe de modèle » afin de prédire et/ou d'expliquer leur évolution. Il est également amené à enrichir le modèle afin de rendre compte d'une palette étendue de situations. Les modalités d'enrichissement du modèle dépendent d'une exigence de cohérence interne :

« l'invariance des propriétés des particules elles-mêmes doit conduire les élèves à introduire une variabilité des relations entre particules (distances, organisation) pour rendre compte des variations observées et à construire des relations sémantiques liant la description phénoménologique retenue et la description mettant en jeu les particules » (p. 54).

Ainsi, lors de la dilatation d'un solide, par exemple, il est impossible d'affirmer que « les particules gonflent » puisque le germe de modèle interdit l'indéformabilité des particules : l'exigence de cohérence interne du modèle encourage alors à recourir à une idée d'augmentation de distance moyenne entre molécules afin d'interpréter le phénomène de dilatation.

Afin de mieux se rendre compte du caractère dynamique des particules, Méheut (1996) propose un logiciel de simulation informatique destiné à un public du secondaire supérieur qui génère « une image de petites entités mobiles se déplaçant dans un cadre rectangulaire » (p. 12) qui peut être divisé en deux par une paroi fixe ou mobile. Le programme informatique utilise la théorie cinétique des gaz afin de coder le déplacement des entités mobiles. Le but de la simulation est de renforcer l'aspect prédictif (et non seulement interprétatif) d'un modèle particulaire : en effet, il est possible de prévoir le comportement de la paroi en termes de déplacement et d'immobilisation à l'équilibre lorsqu'on soumet les sous-systèmes gazeux à des modifications de pression, de volume ou de température.

Toutes les séquences d'enseignement proposées ci-dessus sont donc constituées d'une succession d'activités de structure similaire : introduction d'un phénomène – application/enrichissement du modèle afin d'expliquer le phénomène et/ou de prédire son évolution – introduction d'un nouveau phénomène – application/enrichissement du modèle qui a déjà été complété à l'étape précédente – etc. Ces « boucles » permettent au final de fédérer une multiplicité de phénomènes à l'aide d'un modèle unique. C'est ce que soulignent Larcher & al. (1990) :

« Le concept de particule tel qu'il est construit par les physiciens est très fécond puisqu'il permet, dans un cadre théorique unique, de rendre compte de

phénomènes très différents. (...) Nous avons fait l'hypothèse que c'est en donnant un point de vue unificateur sur un ensemble de phénomènes que le modèle jouera son rôle d'instrument d'intelligibilité » (p. 51-52)

L'hypothèse d'apprentissage sous-jacente est que l'adhésion des élèves au modèle proposé est indispensable à l'avancée des savoirs : c'est le grand pouvoir explicatif du modèle particulière qui est censé emporter la conviction des élèves en leur donnant un « pouvoir d'agir » sur différents phénomènes du monde qui les entoure.

2.2.4 Les connaissances des enseignants à propos des états et des changements d'état

Dans la lignée des travaux issus de la théorie du changement conceptuel, quelques recherches (Chang, 1999 ; Papageorgiou, Stamovlasis & Johnston, 2010 ; Kokkotas, Vlachos & Koulaidis, 1998) s'intéressent aux conceptions des enseignants titulaires ou en formation initiale et continue à propos des états de la matière et des changements d'état. Il s'avère que d'une part, les enseignants adoptent des conceptions erronées du point de vue scientifique sur ces sujets et que d'autre part, ces conceptions présentent une similarité importante avec celles des enfants. Citons Chang (1999) et Kokkotas & al. (1998) :

« Examining in detail the ideas that students presented in the open-ended test and interviews, it was found that the majority of students [Teachers in training] had no clear or enough understanding of water vapor; although they could state that water evaporated or water became water vapor, most of them could not imagine the status when water vapor exists in the air » (Chang, 1999, p. 524)

« During the teaching sessions it was revealed that prospective teachers attribute to particles macroscopic properties, such as hardness, or that molecules expand, evaporate, etc. » (Kokkotas & al., 1998, p. 298).

Aux mêmes maux, les mêmes remèdes : ces études recommandent de s'attarder en priorité sur la compréhension de l'état gazeux (« the researchers think a deeper understanding about "water vapor" and "air" would be beneficial for the achievement of students' conceptual change regarding these concepts » d'après Chang, 1999, p.525) et de développer l'apprentissage des modèles particuliers afin de faciliter en retour la lisibilité macroscopique des changements d'état (« understanding physical phenomena is related to understanding the particulate theory of substances » selon Papageordiou & al., 2010, p. 644).

Peu d'études s'intéressent aux PCK (pedagogical content knowledge ; Shulman, 1986) concernant les états de la matière. Citons néanmoins Morge (2003) : dans une perspective de connexion entre les nombreux travaux didactique francophones sur les modèles particuliers (cf. 2.2.3) et leur appropriation par les enseignants sur le terrain, celui-ci répertorie les connaissances locales spécifiques à une séance d'enseignement dont l'enseignant aurait avantage à se saisir pour mener à bien son enseignement. Dans le cas d'une séance au sujet d'un modèle particulière, ces connaissances concernent notamment « les productions possibles d'élève en fonction des tâches proposées et du niveau des élèves » (p. 119), « l'influence de la consigne sur les productions des élèves » (p. 120) et les « arguments mobilisables en fonction

des productions [d'élèves] » (p. 119). Dans la décision d'accepter ou de refuser une proposition d'élèves, Morge souligne que c'est bien les connaissances de référence qui constituent « l'espace de négociation offert à l'enseignant et aux élèves impliqués dans l'interaction » (p. 112).

2.3 Positionnement et Conclusion

En didactique des sciences, les notions de « conception initiale », de « théorie naïve », de « modèles alternatifs » sont répandues, comme le démontre la revue de littérature effectuée dans ce chapitre :

- Certains chercheurs en psychologie du développement cognitif et en didactique des sciences (Carey, 1985 ; Vosniadou, 1994) ont émis l'hypothèse de l'existence d'un « déjà-là du sens commun » défini comme l'ensemble des perceptions, représentations, idées ou modes de raisonnement que les élèves possèdent a priori à propos de différents phénomènes naturels. Ce déjà-là du sens commun s'est vu donné différentes dénominations (les « conceptions initiales », les « théories naïves », les « modèles alternatifs »), en fonction des caractéristiques qui lui ont été attribuées. Nous avons répertorié celles relatives aux états de la matière et aux changements d'état faisant intervenir l'état gazeux (évaporation, ébullition, condensation) (cf. 2.2.2).
- En se fondant sur un parallèle entre les remplacements successifs des structures de recherche dans l'histoire des sciences et les évolutions conceptuelles se déroulant au sein d'un individu en cours d'apprentissage, les partisans de la théorie dite « du changement conceptuel » (Posner, Strike, Hewson & Gertzog, 1982) ont proposé un modèle de la transition entre les « théories naïves » ou « conceptions initiales » portées par les élèves et les points de vue scientifiques à travers la mise en scène d'anomalies qui doivent créer des conflits cognitifs au sein des conceptions existantes des apprenants.
- La théorie des deux mondes, portée par Tiberghien notamment dédouble le niveau des théories et des modèles et le niveau des objets et phénomènes en une version « naïve » et une version « scientifique », en faisant l'hypothèse qu'il existe une certaine modélisation du monde matériel en œuvre au sein des pratiques quotidiennes.

La caractérisation des « conceptions initiales » a été abondamment menée dans ces recherches et a parfois abouti à la formalisation de certains de leurs aspects : les « conceptions initiales » présenteraient une certaine stabilité à la fois temporelle et lors de la confrontation à différentes situations ; elles seraient préexistantes à l'interaction avec le chercheur qui se contente de les révéler ; elles seraient en rupture avec le point de vue scientifique ; elles seraient embarquées dans des structures plus vastes qui s'apparentent à des « théories » et seraient connectées de façon cohérente à des réseaux de concepts ; elles sont parfois considérées comme des invariants du développement humain. Les études de didactique des sciences qui aboutissent à des longues énumérations de conceptions (en mécanique, en optique, en électricité, etc.) ont souvent contribué à naturaliser ces caractéristiques.

Pourtant, chacune d'entre elles a donné lieu à des débats internes ou externes au champ de la didactique des sciences. Nous en effectuons une revue succincte, en nous appuyant sur les critiques des travaux déjà cités sur les états et changements d'état de la matière (Johnson, 1998a, 1998b ; Tytler, 2000 ; Lee & al., 1993).

- Les premières caractéristiques en débat concernent la stabilité des « conceptions initiales » et leur préexistence avant l'interaction avec le chercheur qui les « recueille ».
 - Prenons l'exemple de la recherche d'Osborne & Cosgrove (1983) : ces auteurs s'interrogent sur les conceptions des enfants relatives à l'apparition des gouttelettes d'eau sur les parois d'un récipient rempli de glaçons. Pour sonder ces conceptions, ils choisissent de poser aux enfants la question suivante : « D'où les gouttelettes d'eau viennent-elles ? ». Ce choix de question a été critiqué par Johnson (1998b) avec les arguments suivants :

« Phrased in this way, the question takes the conservation of water for granted - a conservation which understands that water can be in different states. Pupils do not necessarily see things in this way, but if they feel pressed for a source of water (which they understand as liquid water) might invent a reply. The relatively high incidence of pupils saying that water comes through the glass, reported by Osborne and Cosgrove, might be a consequence of this line of questioning » (p. 699)

Autrement dit, la nature de la question force les enfants à trouver un endroit d'où les gouttelettes proviennent : il est alors naturel de faire appel à la source d'eau liquide la plus proche, c'est-à-dire l'intérieur du récipient. La conception C3 référencée ci-dessus (« L'eau liquide passe de l'intérieur à l'extérieur du récipient ») ne refléterait donc en aucun cas la structure mentale de l'enfant : en fait, l'idée que l'eau liquide traverse les parois du récipient ne serait pas une conception du tout mais le fruit d'une décision prise sur le moment en réponse à une question particulière.

- Nous proposons un autre exemple qui illustre l'influence des situations expérimentales proposées sur la nature des réponses produites par les enfants :

« There were considerable differences in the patterns of response for the different phenomena; the different contexts cued different images. For instance, the outside phenomena (puddle; drying clothes) tended to cue water cycle responses, while for the year 6 children, the water tank was more likely to cue air responses, and the eucalyptus oil cued strong associations with changes in form with references to fumes, or vapour » (Tytler, 2000, p.453)

Ici encore, les réponses des enfants ne paraissent pas refléter des représentations mentales stables mais être produites *hic et nunc* en fonction des caractéristiques saillantes des situations expérimentales proposées.

- Ces critiques s'étendent aux autres domaines de la physique. Dans une étude sur le changement conceptuel en mécanique, Rowlands, Graham, Berry & McWilliam (2007) finissent pas admettre que :

« Misconceptions may be seen more in terms of spontaneous reasoning. (...) [Spontaneous reasoning] is usually the first thing that comes to mind and can be influenced by what stands out in the question. (...) The point is we cannot assume that a misconception is formed prior to its revelation. It would be better to assume the converse: that misconceptions are spontaneous, they are evoked (constructed) rather than revealed » (p. 25)

« Les enfants inventent une réponse » affirme Johnson dans la citation ci-dessus et on pourrait ajouter « pour satisfaire le chercheur qui lui en demande une » : n'oublions pas que la relation entre l'enfant et le chercheur se construit sous couvert d'un contrat particulier dans lequel l'enfant est sommé de trouver une réponse. Ces éléments relativisent la portée du discours de l'enfant en le recontextualisant dans une situation de recherche (et de communication) bien précise.

- La deuxième caractéristique en débat concerne l'estimation de la rupture des « conceptions » avec le point de vue scientifique. Quels sont les critères pour juger, dans le contexte d'un entretien, qu'une « conception » est en décalage avec la perspective scientifique sur une question donnée ?

Prenons l'exemple des conceptions E1 et E5 au sujet de l'évaporation. La conception E1 fait référence à la disparition de l'eau et la conception E5 affirme que l'eau s'est transformée en air. Ces conceptions sont-elles scientifiquement erronées pour autant ? Au sujet de la conception E1, Tytler (2000) écrit :

« The previous findings that children commonly hold a position that water 'disappears' is a simplification of their thinking, arising from the imposition of an adult perspective on their responses. Children (and adults) can use the term 'disappear' to mean a variety of things, including that water can no longer be seen » (p. 460).

Tytler défend donc l'idée que, lorsque l'enfant affirme que l'eau d'une flaque disparaît, il n'est pas en train de prôner une non-conservation de matière mais il utilise le terme « disparaître » dans le sens usuel de « devenir imperceptible ».

Au sujet de la conception E5, sachant que « the pupils' meaning for the terms 'air', 'oxygen' and 'gas' is particularly problematic [and] unless one has good reason to think otherwise, these terms must be regarded as synonymous » (Johnson, 1998a, p. 573), il est possible d'affirmer que « there was much evidence to suggest that these pupils were not meaning a transmutation of substances but were using 'air' as a general term for the gas state (Johnson, 1998b, p. 701). Autrement dit, lorsque l'enfant affirme que l'eau disparue est devenue de l'air, il n'indique pas une transmutation de matière mais utilise le terme « air » comme s'il recouvrait la notion de gaz en général.

Ces exemples permettent de pointer la limite des méthodologies majoritaires dans le recueil des « conceptions », notamment lorsqu'un terme ou un élément de discours est extrait hors de son contexte de production (l'entretien avec le chercheur) afin de le

transformer en « conception », sans investiguer davantage l'usage et l'insertion de ces termes dans des pratiques sociales externes à l'entretien.

- La troisième caractéristique en débat concerne l'estimation du degré de cohérence des « conceptions initiales », cette estimation faisant parfois l'objet de publications entières (Kirbulut & Beeth, 2011). Comment évaluer la cohérence des « conceptions initiales » quand le point de vue de l'enfant et celui de l'adulte sont largement incomparables car non-fondés sur les mêmes repères ?

Pourtant, la cohérence des conceptions des enfants est parfois appréhendée d'un point de vue extérieur à l'enfant : le chercheur connaît déjà le modèle visé par l'enseignement et n'ignore pas que des phénomènes en apparence disjoints (la flaque qui n'est plus là le lendemain, les habits qui sèchent, l'eau qui bout) sont sous la coupe du même cadrage théorique, ce qui n'est pas le cas de l'enfant. Un enfant qui donne trois explications très différentes à ces phénomènes ne fait pas preuve d'incohérence. Tytler (2000) ne s'avance guère sur ce sujet :

« They [Children] do not have a clear position on conservation, but use the ontological categories of matter (water), events (the appearance of fog), and properties (dampness) in flexible, ambiguous ways. From an adult perspective these children do not conserve. From the child's perspective the question is not particularly pertinent » (p. 461).

Autrement dit, l'incommensurabilité des cadres interprétatifs de l'enfant et du chercheur rend très délicat le travail d'élucidation de la pensée de l'enfant à travers l'analyse du discours d'entretien : cette pensée demeure mystérieuse, pour une large part.

Conclusion

Sans remettre en cause radicalement les résultats des recherches produites dans le cadre de l'approche des « conceptions initiales », les limites de ces recherches nous rappellent de les appréhender avec souplesse dans le cadre de notre travail. Pour notre part, nous les utilisons à deux occasions :

- La théorie des deux mondes nous permet de catégoriser les éléments de discours qui apparaissent en classe. Pour analyser les actions de l'enseignant et des élèves, nous recourons au point de vue pragmatiste, qui s'attache à saisir les significations du point de vue des acteurs (cf. 1.3.2). Ainsi, nous considérons que : i) les élèves construisent certains rapports aux objets du milieu, construction fondée sur leur interprétation de ce que l'enseignant attend dans une situation donnée et que ii) ces rapports peuvent être dérivés de l'usage familier des objets ou bien de leur usage scientifique. Dans le premier cas, nous les nommons « rapport initial aux objets » ou « rapport premier », ce qui signifie que ces rapports se fondent essentiellement sur des références externes à la classe, souvent issues de la vie quotidienne.
- Les listes de conceptions répertoriées ci-dessus sont également susceptibles de fournir un appui pour le premier niveau d'analyse a priori : en nous révélant les rapports aux objets

que les élèves construisent dans des situations d'entretien qui se veulent peu contraintes, elles contribuent à déterminer les usages de certains termes familiers (« air », « gaz », « évaporation », etc.) et de là, à remonter aux obstacles épistémologiques posés aux élèves.

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons répertorié quelques modèles de la logique de construction des savoirs scientifiques selon certains courants de l'épistémologie (l'inductivisme, la démarche hypothético-déductive, les programmes de recherche, l'anarchisme épistémologique), accompagnés de leur reprise en didactique des sciences. Nous nous intéressons dans le prochain chapitre à leur éventuelle transposition dans les textes prescriptifs des quatre contextes qui nous intéressent : France primaire, France secondaire inférieur, Suisse romande primaire et Suisse romande secondaire inférieur.

Chapitre 3 ÉTUDE DES CONTEXTES INSTITUTIONNELS DE L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES PHYSIQUES EN FRANCE ET EN SUISSE ROMANDE À L'ARTICULATION PRIMAIRE- SECONDAIRE

Ce chapitre vise à éclairer les dimensions institutionnelles qui organisent potentiellement les pratiques d'enseignement à l'école obligatoire en France et en Suisse romande. L'objectif est de mettre en évidence des pré-construits institutionnels en faisant l'hypothèse qu'ils agissent comme des déterminants venant contraindre les pratiques des classes ordinaires. L'analyse comparatiste nous paraît particulièrement féconde sur ce point : elle permet de révéler des particularités possiblement négligées car allant de soi dans un système de référence unique. Nous conduisons donc ce travail de décentration à travers la comparaison des textes prescriptifs relatifs à l'enseignement des sciences physiques dans les quatre systèmes éducatifs, le primaire en France, le secondaire inférieur en France, le primaire en Suisse romande, le secondaire inférieur en Suisse romande⁸. Les similitudes et les différences que révèle l'analyse comparative des quatre contextes devraient nous permettre de remonter aux choix de transposition externe, inhérents à l'histoire des réformes scolaires dans chacune des institutions.

Les textes curriculaires seront analysés selon les critères suivants : les objectifs et visées de l'enseignement des sciences, les exigences attendues des élèves en termes de savoir et de savoir-faire et enfin les méthodes de reconstruction des connaissances privilégiées dans les salles de classe avec un focus tout particulier sur les responsabilités que ces méthodes réservent à l'enseignant et aux élèves et sur leurs références épistémologiques, didactiques, pédagogiques et politiques éventuelles.

3.1 L'enseignement des savoirs liés aux phénomènes physiques au primaire et au secondaire en France

3.1.1 Organisation générale de l'enseignement des sciences physiques en France

En France, au primaire supérieur (CE2-CM1-CM2 - élèves de 8-11 ans), les savoirs liés aux phénomènes physiques sont enseignés au sein du domaine disciplinaire « Sciences expérimentales et technologie » par un enseignant polyvalent. Ce domaine totalise un enseignement annuel de 78 heures, avec une répartition équilibrée entre sciences du vivant et sciences physiques.

Au secondaire inférieur (6^{ième}- 5^{ième} - 4^{ième} -3^{ième}- élèves de 11-15 ans), les savoirs liés aux phénomènes physiques sont enseignés au sein de la discipline « Physique-Chimie » par un

⁸ Les textes institutionnels auxquels nous nous référons dans ce chapitre sont ceux qui correspondent à la période des enregistrements vidéo. De ce fait, certains n'ont plus cours en 2019 (notamment, le programme de physique-chimie du collège, en France). Par souci de lisibilité, nous utilisons néanmoins le présent pour les décrire.

enseignant spécialiste. L'enseignement de la discipline bénéficie d'une heure et demie hebdomadaire de la 5^{ème} à la 3^{ème}.

Le savoir à enseigner est communiqué aux enseignants à travers des textes qui sont publiés dans le Bulletin Officiel du ministère de l'Éducation nationale. Tous les enseignants des établissements publics sont contraints à les respecter. Les enseignants du primaire ont à leur disposition deux documents institutionnels de référence : « Le programme de sciences expérimentales et technologie » (MEN, 2008a) et « Les ressources en sciences expérimentales et technologie » (MEN, 2012). Les enseignants du secondaire disposent, quant à eux, du « Programme de physique-chimie » (MEN, 2008b). Par ailleurs, les enseignants des deux ordres (primaire et secondaire) sont censés tenir compte du socle commun de connaissances et de compétences, texte officiel (2015) qui s'articule en cinq domaines de formation définissant les connaissances et les compétences à acquérir : (a) les langages pour penser et communiquer ; (b) les méthodes et outils pour apprendre ; (c) la formation de la personne et du citoyen ; (d) les systèmes naturels et les systèmes techniques et (e) les représentations du monde et l'activité humaine. Plusieurs manuels scolaires de différentes maisons d'édition sont publiés relativement à chacun des niveaux scolaires. Cependant, aucun d'entre eux n'a valeur d'injonction institutionnelle et c'est à l'enseignant que revient la liberté de choisir les moyens et outils qu'il souhaite pour atteindre les objectifs qui lui sont prescrits dans les textes officiels.

3.1.2 Analyse des documents institutionnels de référence pour les sciences physiques au primaire et au secondaire inférieur

3.1.2.1 Les documents institutionnels de référence spécifiques à l'école primaire

Les deux documents de référence au primaire supérieur (« Le programme de sciences expérimentales et technologie » de 2008 et « Les ressources en sciences expérimentales et technologie » de 2012) développent trois axes principaux : les enjeux et objectifs fondamentaux de l'enseignement des sciences, la méthode privilégiée de leur enseignement, à savoir « la méthode d'investigation selon l'esprit Main à la pâte » (MEN, 2008a, p. 24) et enfin, une liste thématique des savoirs à aborder.

Enjeux et objectifs principaux de l'enseignement des sciences expérimentales

- L'enseignement des sciences est d'abord censé permettre aux élèves de comprendre le monde environnant :
 - « Les sciences expérimentales et les technologies ont pour objectif de comprendre et décrire le monde réel ; celui de la Nature et celui construit par l'Homme » (MEN, 2008a, p. 24)
- Cet enseignement doit accorder une place à l'émergence d'une prise de conscience des responsabilités individuelles et/ou collectives vis-à-vis de la préservation de la nature :
 - « Familiarisés avec une approche sensible de la nature, les élèves apprennent à être responsables face à l'environnement, au monde vivant, à la santé. Ils

comprennent que le développement durable correspond aux besoins des générations actuelles et futures. » (MEN, 2008a, p. 24)

- L'enseignement des sciences doit aussi contribuer à la maîtrise de plusieurs capacités transversales :

« Les connaissances (...) sont acquises dans le cadre d'une démarche d'investigation qui développe la curiosité, la créativité, l'esprit critique » (MEN, 2008a, p. 24)

La démarche d'investigation selon l'esprit « Main à la pâte »

Les documents institutionnels prescrivent aussi une méthode de construction des savoirs à privilégier dans la classe, la « démarche d'investigation (...) selon l'esprit Main à la pâte » (MEN, 2008a, p. 24). De façon étonnante, aucune description de la démarche n'accompagne ce parti-pris. Cependant, cette ellipse s'explique par l'accessibilité d'une référence plus ancienne pour les enseignants : en effet, les programmes de 2002 (MEN, 2002) explicitent en détail l'opérationnalisation de cette démarche d'investigation dans les documents d'accompagnement. Ceux-ci proposent une mise en place de la démarche qui suit un déroulement en cinq étapes consécutives :

- « Le choix de la situation de départ
- La formulation du questionnement des élèves
- L'élaboration des hypothèses et la conception de l'investigation
- L'investigation conduite par les élèves
- L'acquisition et la structuration des connaissances » (MEN 2002, p. 8-9)

La démarche d'investigation est donc présentée comme une succession d'étapes qui s'organisent dans le but de répondre à un problème soulevé par une situation de départ.

Plusieurs remarques peuvent être établies à propos de cette opérationnalisation de la démarche.

Responsabilité de l'enseignant, responsabilité de l'élève : renversement des positions

Les élèves semblent avoir à leur charge la majeure partie de l'avancement de l'investigation. La démarche doit d'abord « s'articuler sur [leur] questionnement sur le monde réel » (MEN, 2002, p. 8). Puis, ce sont les élèves qui sont censés « formuler des hypothèses », « élaborer des expériences destinées à valider ou invalider les hypothèses », « conduire l'investigation » et enfin « communiquer les résultats obtenus » (MEN, 2002, p. 8-9). Au final, il s'agit bien, comme le document le précise, d'une « investigation menée par les élèves guidés par la maître » (MEN, 2002, p. 8). Dans cette perspective, les fonctions de l'enseignant se trouvent modifiées par rapport au schéma classique de l'enseignement par transmission directe des résultats scientifiques : désormais, son rôle se limiterait à proposer un choix initial pertinent de situation-problème en début d'investigation et à structurer et institutionnaliser les connaissances nouvellement acquises en fin d'investigation. Entre temps, il est attendu que les élèves se comportent comme des « apprentis scientifiques » sous le guidage parcimonieux de l'enseignant.

Le renversement des positions de l'enseignant et des élèves s'inscrit dans un mouvement plus vaste, qui vise à faire de l'élève un constructeur de ses propres connaissances, et sur lequel nous reviendrons en détails plus bas (cf. 3.1.3).

La méthode hypothético-déductive comme référence épistémologique

Au niveau transpositif, la structure de la démarche d'investigation et le vocabulaire employé dans sa description suggèrent que la pratique sociale de référence des scientifiques a été une source d'inspiration majeure des concepteurs du programme. Il est ainsi sous-entendue l'idée que les savoirs scientifiques s'enseigneraient d'une façon optimale lorsque les élèves tentent de reproduire au plus près les procédures des scientifiques.

La succession des étapes (problème initial, émission d'hypothèses, élaboration d'expériences pour tester les hypothèses, validation ou invalidation des hypothèses) présente des similitudes avec celles de la démarche hypothético-déductive telle que développée par Bernard (1865) : ce modèle idéalisé de logique de la découverte scientifique présentent des potentialités et des limites qui ont été décrites plus haut (cf. 2.1.2.2). D'autre part, on peut noter que la démarche d'investigation elle-même a subi des modifications par rapport au schéma princeps de Bernard (cf. 2.1.2.2) : par exemple, le problème initial n'est pas inséré dans un cadre théorique et semble davantage être de l'ordre d'un questionnement « naïf » des élèves ou bien d'une situation contre-intuitive (situation-problème). De même, les hypothèses semblent n'être adossées à aucun système théorique.

Malgré cela, on peut considérer que la méthode hypothético-déductive constitue une référence épistémologique importante de la démarche d'investigation.

La place des conceptions initiales des élèves

Il est également demandé à l'enseignant d'accorder une importance aux conceptions initiales des élèves :

« L'expression des conceptions initiales des élèves pourra se faire aussi bien à l'oral que lors d'écrits individuels, mais ne sera bien souvent complète qu'à l'occasion de la mise en œuvre d'une première expérimentation. Celle-ci permet au maître de mieux cerner les théories implicites des élèves, et à ces derniers de mieux identifier la nature scientifique du problème posé » (MEN, 2002, p. 8)

Nous avons d'ailleurs souligné dans la section 2.1.2.3 que la démarche d'inspiration hypothético-déductive et le dépassement des conceptions initiales se conjugaient souvent dans la littérature de didactique des sciences (Halloun & Hestenes, 1985 ; Vosniadou, 1994 ; Gyllenpalm & Wickman, 2011). Dans ce cadre, les hypothèses imaginées par les élèves sont censées refléter leurs « conceptions initiales » ou « théories naïves » et c'est leur invalidation à travers la conception et la réalisation d'une (ou plusieurs) expérience(s) cruciale(s) qui fait office d'anomalie(s) et qui crée le conflit cognitif désiré. Cela dit, le programme ne précise pas le rapport éventuel entre hypothèse et conception, ou entre hypothèse et prévision, notion également présente dans le programme (MEN, 2002, p. 8). Si l'on considère qu'une prévision est fondée sur une hypothèse donnée, une prévision non vérifiée par l'expérience engendre-t-

elle automatiquement une invalidation de l'hypothèse correspondante et un dépassement de la conception qu'elle reflète ? Le mutisme du programme sur ces questions témoigne de l'ampleur du travail dévolu aux enseignants qui doivent notamment démêler le rôle à attribuer à ces trois notions (hypothèse, conception, prévision) dans la construction de la leçon mettant en scène une démarche d'investigation.

Progression thématique des enseignements / apprentissages en sciences physiques

Le programme dégage une progression thématique des enseignements / apprentissages en sciences physiques au primaire supérieur. En ce qui concerne les propriétés de la matière (cf. Figure 6) :

La matière
 L'eau : une ressource
 - états et changements d'état ;
 - le trajet de l'eau dans la nature ;
 - le maintien de sa qualité pour ses utilisations.
 L'air et les pollutions de l'air.
 Mélanges et solutions.
 Les déchets : réduire, réutiliser, recycler.

Figure 6 : Extrait du programme français au primaire sur la matière (MEN, 2008a, p. 24)

Ce découpage thématique est détaillé par « les ressources en sciences expérimentales et technologie 2012 » (MEN, 2012). En ce qui concerne les propriétés de la matière (cf. Figure 7) :

Cours élémentaire deuxième année	Cours moyen première année	Cours moyen deuxième année
<p>États et changements d'état</p> <ul style="list-style-type: none"> • Connaître les trois états physiques de l'eau. • Savoir que d'autres matières changent d'état. • Mettre en évidence les caractéristiques de différents états physiques observés. • Isoler des paramètres intervenant dans l'évaporation (température, surface libre, ventilation...). <p>Vocabulaire : état physique, matière, solide, liquide, gazeux, ébullition, évaporation, vapeur, condensation, fusion, solidification, glace.</p>	<p>Mélanges et solutions</p> <ul style="list-style-type: none"> • Distinguer deux types de mélanges : homogènes et hétérogènes. • Apprendre à séparer les constituants des mélanges par l'expérimentation. • Identifier les procédés permettant de séparer les constituants des mélanges homogènes et hétérogènes. • Connaître quelques caractéristiques des mélanges homogènes (conservation de la masse, saturation). <p>Vocabulaire : mélange, miscible, solution, soluble, dissolution, saturation, homogène, hétérogène, suspension, décantation, filtration.</p>	<p>États et changements d'état</p> <ul style="list-style-type: none"> • Savoir que les changements d'état de l'eau se font à température fixe (0°C et 100°C sous la pression atmosphérique normale). • Découvrir qu'une masse d'eau solide occupe un volume plus important que la même masse d'eau liquide. <p>Vocabulaire : vaporisation, liquéfaction, fusion, solidification.</p>

Figure 7 : Extrait des ressources en sciences au primaire sur la matière (MEN, 2012, p. 3)

La structure des items (« connaître les trois états physiques de la matière », « savoir que les changements d'état de l'eau se font à température fixe », etc.) ainsi que la liste des mots de vocabulaire à connaître (en bleus) montrent la place accordée à la maîtrise de savoirs propositionnels et d'un lexique spécifique au domaine. Le travail du « français transversal », idée-pivot du programme (MEN, 2008a), est perceptible jusque dans la manière de définir les objets d'apprentissage des autres disciplines, au risque de dénaturer ces objets.

Remarquons enfin que certaines thématiques du programme de sciences expérimentales concernent l'environnement et le développement durable (MEN, 2012, p. 11) : les déchets, le circuit de traitement de l'eau, les pollutions de l'air comptent parmi les sujets abordés sur ce thème.

Conclusion

Au primaire en France, les objectifs de l'enseignement des sciences expérimentales sont diversifiés : l'enseignement est censé permettre aux élèves de comprendre le monde environnant, leur faire prendre conscience des responsabilités individuelles et/ou collectives vis-à-vis de la préservation de la nature, et leur faire développer des connaissances transversales, comme la curiosité ou l'esprit critique.

La « démarche d'investigation selon l'esprit Main à la pâte » est la démarche d'enseignement à privilégier pour l'ensemble des sciences expérimentales : dans les documents d'accompagnement du programme antérieur (MEN, 2002), elle se présente sous la forme d'un canevas de cinq étapes articulées afin de répondre à un problème soulevé par une situation initiale. Elle exhibe quelques caractéristiques saillantes : ce sont les élèves qui sont censés mener l'investigation sous la houlette de l'enseignant ; la méthode hypothético-déductive s'impose comme une référence épistémologique importante de la démarche d'investigation ; les conceptions initiales des élèves doivent être prises en compte dans sa dynamique.

Quant au découpage thématique, il se concentre sur la maîtrise de savoirs propositionnels et d'une liste de vocabulaire propre aux sciences, en accord avec l'investissement important dévolu à la maîtrise de la langue à l'école primaire à ce niveau. Les manières d'articuler cette exigence thématique avec l'utilisation de la démarche d'investigation sont laissées à la charge de l'enseignant.

3.1.2.2 Le document institutionnel de référence spécifique au secondaire inférieur : Le programme de physique-chimie au collège 2008

Le programme de physique-chimie 2008 (MEN, 2008b), à destination des enseignants du collège, se décompose en trois parties distinctes : une « introduction » commune à l'ensemble des disciplines scientifiques et technologiques (mathématiques, physique-chimie, SVT et technologie), suivie d'un « préambule spécifique » à la discipline physique-chimie et enfin une progression des enseignements / apprentissages au fil des trois années du collège.

Les deux premières parties, que nous associons sous le terme « recommandations générales », s'étalent sur une douzaine de pages et s'avèrent particulièrement denses. Retenons qu'elles développent deux axes thématiques principaux : d'une part, les enjeux et objectifs principaux de l'enseignement des sciences (et a fortiori de la physique-chimie), et d'autre part, une méthode de construction des savoirs à privilégier dans la classe, la « démarche d'investigation ». Déployons le contenu de ces deux axes.

Enjeux et objectifs principaux de l'enseignement des sciences

D'après les recommandations générales⁹ :

⁹ Les thèmes de convergence, couverts grâce à la collaboration de plusieurs disciplines, contribuent à l'un ou l'autre de ces objectifs : ils n'introduisent pas « de nouvelles compétences exigibles » et « ne font pas l'objet d'un enseignement spécifique » (MEN, 2008b, p. 5).

- L'enseignement des sciences est d'abord censé donner aux élèves des outils (théories, modèles, lois) qui leur permettent de comprendre et de rendre compte du monde environnant :
 - « Les sciences expérimentales et la technologie permettent de mieux comprendre la nature et le monde construit par et pour l'Homme » (MEN, 2008b, p. 1)
- Cet enseignement doit aider au développement chez les élèves de capacités spécifiques à la discipline, calquées sur celles de l'activité sociale de référence du scientifique :
 - « L'acquisition par l'élève d'une culture scientifique nécessite (...) de disposer de capacités qui permettent de mobiliser ces connaissances dans des situations variées. L'enseignement de physique-chimie doit ainsi permettre à l'élève d'être notamment capable de pratiquer une démarche scientifique » (MEN, 2008b, p. 9).
- Il doit aussi favoriser la maîtrise de capacités transversales, telles « la curiosité, l'imagination raisonnée, l'ouverture d'esprit, l'esprit critique, le respect de soi et des autres, (...) l'autonomie et l'initiative, etc. » (MEN, 2008b, p. 9).
- L'enseignement des sciences est censé encourager les élèves à prendre conscience des conséquences de leurs décisions quotidiennes à une échelle individuelle (santé, alimentation, sécurité, etc.) et collective (recyclage, économies d'énergie, etc.) :
 - « Peu à peu s'introduit l'interrogation majeure de l'éthique dont l'éducation commence tôt : qu'est-il juste, ou non, de faire ? (...) Quelle attitude responsable convient-il d'avoir face au monde vivant, à l'environnement, à la santé de soi et de chacun ? » (MEN, 2008b, p. 2).
- Dans le même ordre d'idée, il doit également favoriser la compréhension des controverses sociétales liées à des thématiques scientifiques, telles que le dérèglement climatique ou la gestion des ressources énergétiques, puisque « ces disciplines ont aussi pour enjeu de comprendre les enjeux sociétaux de la science et de la technologie. » (MEN, 2008b, p. 1).
- D'autres objectifs apparaissent dans les recommandations générales, quoique de façon moins prégnantes : l'enseignement des sciences doit « contribuer à la maîtrise de la langue française » (MEN, 2008b, p. 10) mais aussi « à la pratique d'une langue vivante étrangère » (MEN, 2008b, p. 10) ; il doit développer « l'utilisation de l'outil informatique » (MEN, 2008b, p. 10) mais aussi « sensibiliser à l'histoire des arts » (MEN, 2008b, p. 11) ; il doit faire prendre conscience aux filles « qu'elles sont à leur place dans le monde des sciences, à l'encontre de certains stéréotypes qui doivent être combattus » (MEN, 2008b, p. 1), etc.

Les objectifs développés sont contrastés et nombreux : ils sont les témoins de la multiplicité des sphères d'influence à l'œuvre derrière la rédaction du programme des disciplines scientifiques du collège 2008.

La démarche d'investigation

Le deuxième axe apparaissant dans les recommandations générales a trait à la méthode de construction des savoirs à privilégier dans la classe, la « démarche d'investigation ». Le programme commence par affirmer que « tous les objets d'étude ne se prêtent pas également à sa mise en œuvre » (MEN, 2008b, p. 4) et qu'il « appartient à l'enseignant de déterminer les sujets qui feront l'objet d'un exposé et les sujets pour lesquels la mise en œuvre d'une démarche d'investigation est pertinente » (MEN, 2008b, p. 4). Le programme omet cependant de donner les critères qui permettraient à l'enseignant de faire le tri entre ces deux types de sujet.

Le programme détaille le « canevas » de la démarche d'investigation, c'est-à-dire la forme qu'elle doit prendre lors de sa mise en œuvre dans la classe. Sept étapes sont développées, dont :

- « Étape 1 : Le choix d'une situation-problème par le professeur (en amont de la classe)
- Étape 2 : L'appropriation du problème par les élèves
- Étape 3 : La formulation de conjectures, d'hypothèses explicatives, de protocoles possibles
- Étape 4 : L'investigation ou la résolution du problème conduite par les élèves
- Étape 5 : L'échange argumenté autour des propositions élaborées
- Étape 6 : L'acquisition et la structuration des connaissances » (MEN 2008b, p. 4)

Dans ce processus prescrit de (re)construction des savoirs scientifiques, l'enseignant doit se contenter de choisir la situation-problème de départ (étape 1) et de mettre en évidence les nouveaux éléments de savoir utilisés au cours de la résolution du problème à la fin (étape 6).

Quant aux élèves, ils constituent les moteurs principaux des étapes 2 à 5. Le programme met en avant le rôle actif des élèves, envisagés comme les constructeurs de leurs propres savoirs :

« [La démarche] privilégie la construction du savoir par l'élève. (...) Les modes de gestion des regroupements d'élèves, du binôme au groupe-classe selon les activités et les objectifs visés, favorisent l'expression sous toutes ses formes et permettent un accès progressif à l'autonomie. » (MEN, 2008b, p. 4)

Enfin, la démarche d'investigation est censée intégrer les conceptions initiales des élèves. L'enseignant doit ainsi « identifier les conceptions ou les représentations des élèves, ainsi que les difficultés persistantes (analyse d'obstacles cognitifs et d'erreurs) » (MEN, 2008b, p. 4). Quant aux élèves :

« [Ils] proposent des éléments de solution qui permettent de travailler sur leurs conceptions initiales, notamment par confrontation de leurs éventuelles divergences pour favoriser l'appropriation par la classe du problème à résoudre. » (MEN, 2008b, p. 4)

La démarche décrite dans le programme du collège présente un haut degré de similarité avec celle de l'école primaire : pourtant, les deux programmes ont été rédigés indépendamment. Nous faisons l'hypothèse que cette similarité reflète un consensus local à l'échelle des

concepteurs de ces programmes en termes de références pédagogiques, didactiques et épistémologiques ; nous y reviendrons.

Progression thématique des enseignements en sciences physiques

La troisième partie du programme se concentre sur la progression thématique des enseignements / apprentissages au fil des trois années du collège. Sa structure s'est conservée depuis les programmes de 1994 (Caillot, 1996) : elle se présente sous la forme d'un tableau à trois colonnes qui met en regard des « Connaissances », des « Capacités » et des « Commentaires » à destination des enseignants (cf. Figure 8).

Connaissances	Capacités	Commentaires
COMPOSITION DE L'AIR : de quoi est composé l'air que nous respirons ? Est-il un corps pur ?		
L'air est un mélange de dioxygène (environ 20 % en volume) et de diazote (environ 80 % en volume). Le dioxygène est nécessaire à la vie. <i>Distinction entre un gaz et une fumée.</i>	Extraire d'un document les informations relatives à la composition de l'air et au rôle du dioxygène.	Thèmes de convergence : développement durable, santé
VOLUME ET MASSE DE L'AIR : l'air a-t-il un volume propre ? A-t-il une masse ?		
L'état gazeux est un des états de la matière. Un gaz est compressible.	Proposer une expérience pour mettre en évidence le caractère compressible de l'air. Valider ou invalider une hypothèse.	

Figure 8 : Extrait du tableau à trois colonnes du programme de physique-chimie français (MEN 2008b, p. 17)

Les connaissances listées dans la première colonne

Les « connaissances » qui sont listées dans la première colonne sont structurées en thèmes et en sous-thèmes. Elles s'affichent comme des phrases ou de longs groupes nominaux (« Un gaz est incompressible » ou « Distinction entre un gaz et une fumée » selon des exemples de la Figure 8) qui correspondent à des savoirs propositionnels.

Selon Venturini & Tiberghien (2012a), la répartition et la succession des thèmes sur les trois années d'enseignement de la physique-chimie au collège font preuve d'une cohérence et d'une continuité importantes :

« The themes of grades 7 to 9¹⁰ possess continuity and unity : they belong to three domains of physics and are developed over two or three years. Their topics are articulated over time according the hierarchical structure of physics. In each domain, complexity increases steadily inside a particular grade and also from grade 7 to grade 9 » (p. 460)

Les capacités listées dans la deuxième colonne : quel lien avec la démarche d'investigation ?

Les « capacités » mentionnées dans la deuxième colonne sont de nature diverse mais la plupart procèdent d'un mouvement d'élémentarisation de la démarche d'investigation. On peut notamment retrouver les « capacités » suivantes : « Questionner, identifier un problème », « Valider ou invalider une hypothèse », « Proposer une expérience pour mettre en évidence le caractère compressible de l'air », « Suivre un protocole donné pour mettre en évidence la présence d'eau dans différentes substances », « Extraire des informations de l'observation d'un

¹⁰ Le grade 7 correspond à la 5^{ème} ; le grade 9 correspond à la 3^{ème}

mélange », « Contrôler, exploiter les résultats », « Schématiser ». La plupart d'entre elles constituent donc des briques élémentaires de la démarche d'investigation.

Or, à chaque « connaissance » de la première colonne correspond une ou deux « capacités » (cf. Figure 8) : faut-il alors comprendre qu'une seule étape de la démarche est à travailler, en ignorant les autres étapes, ce qui semble contradictoire avec la vision holistique de celle-ci ? Ou faut-il comprendre que la démarche est bien exposée en entier mais que le reste des étapes est pris en charge par l'enseignant, dévoyant alors le partage des responsabilités en faveur des élèves longuement promu dans l'exposition de la démarche d'investigation ? D'autre part, quelle logique non explicitée dans le programme guide le choix de faire travailler la capacité « valider ou invalider une hypothèse » par rapport à la connaissance « un gaz est compressible » (cf. Figure 8) et la capacité « questionner, identifier un problème » par rapport à la connaissance « les combustions du carbone nécessite du dioxygène et produit du dioxyde de carbone » (MEN, 2008b, p.18) ? Peut-être certaines « connaissances » se prêtent-elles mieux au travail de certaines « capacités », mais le programme est muet quant aux liens de nécessité entre les éléments de « connaissances » et de « capacités ».

D'autre part, il faut souligner que toutes les « capacités » ne sont pas du même ordre, en termes de niveaux de généralité et spécificité. Si certaines « capacités » semblent s'activer sur un contenu de savoir spécifique en rapport avec les « connaissances » de la première colonne, d'autres se maintiennent hors de tout contexte d'appui : « valider ou invalider une hypothèse » ne se réfère à aucun contenu et c'est l'enseignant qui aura la charge de faire des liens avec des éléments de « connaissances » de la première colonne. Enfin, la capacité « mettre en œuvre un raisonnement » est encore plus générique puisque non seulement le contenu de savoir en est absent mais en plus la « capacité » en elle-même déborde du cadre des sciences physiques. Les « capacités » s'étalent donc sur un continuum étendu de généralités/spécificités (cf. Figure 9).

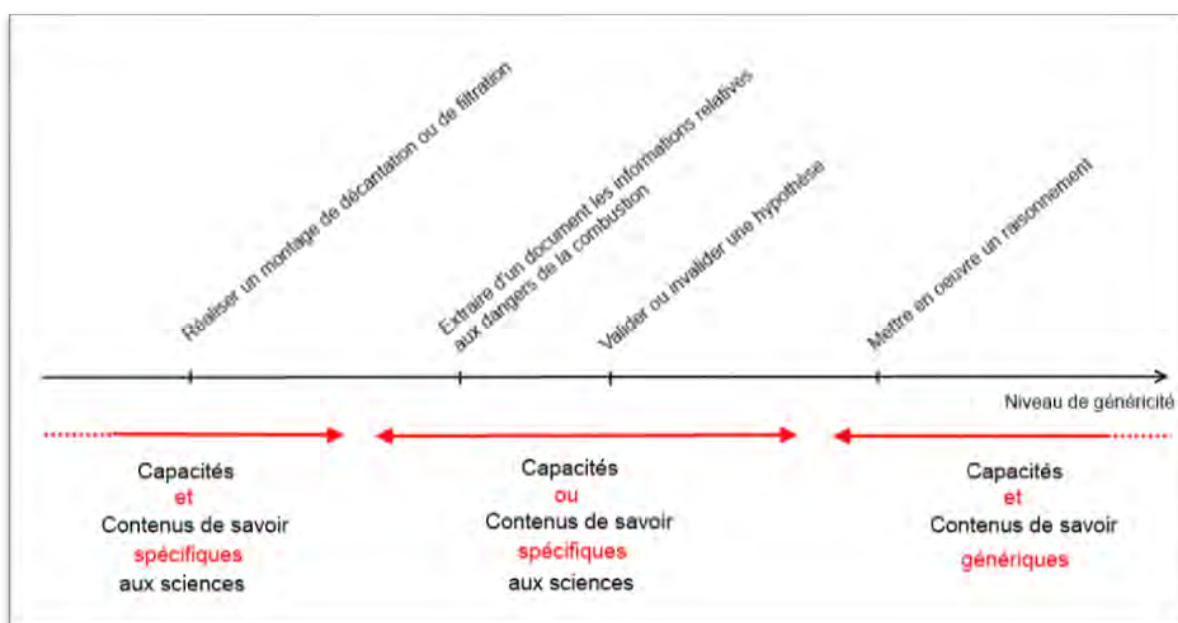


Figure 9 : Niveaux de généralités associés à quatre capacités tirées du programme physique-chimie 2008

Conclusion

Au secondaire inférieur, en France, les objectifs de l'enseignement des sciences apparaissent très ambitieux dans les recommandations générales : ils concernent notamment l'élucidation des événements du monde naturel à l'aide des concepts scientifiques, la maîtrise d'une démarche scientifique, la prise de conscience de l'impact des décisions quotidiennes à l'échelle individuelle et collective et enfin la compréhension des tenants et aboutissants des controverses sociétales liées aux sciences et technologies. Toutefois, le tableau à trois colonnes, qui constitue le corps du programme, est beaucoup plus restrictif et se limite au développement de « connaissances » et de « capacités » relatives à la sphère scientifique.

La démarche d'investigation, introduite dans les recommandations générales, est la démarche d'enseignement qui doit être privilégiée autant que possible dans les salles de classe : elle se présente sous la forme d'un canevas de sept étapes qui s'organisent dans le but de répondre à un problème soulevé par une situation déclenchante. Comme à l'école primaire, ce sont les élèves qui sont censés mener les étapes cruciales de l'investigation ; la méthode hypothético-déductive constitue une référence épistémologique importante bien que sa transposition laisse apparaître des différences importantes avec le schéma princeps développé par Claude Bernard ; le dépassement des conceptions initiales des élèves est un facteur à prendre en compte dans la dynamique de la démarche. La démarche d'investigation se retrouve en tension avec le tableau à trois colonnes qui ne la mentionne plus directement mais distille des « capacités », comme autant d'éléments de démarche d'investigation, qui sont associées à des connaissances particulières.

Au final, le programme laisse deux implicites majeurs : d'une part, le décalage entre les objectifs très ambitieux des recommandations générales et ceux plus restreints des contenus définis dans le tableau à trois colonnes et d'autre part, le décalage entre le tout insécable de la démarche d'investigation des recommandations générales et le morcellement des « capacités » du tableau à trois colonnes.

3.1.3 Conclusion

En France, les programmes de l'école primaire et du secondaire inférieur sont largement indépendants l'un de l'autre : les recommandations générales qui explicitent les buts et les méthodes de l'enseignement des sciences sont distincts à l'école primaire et au collège, le programme de l'école n'insère pas ses apprentissages dans une visée à long terme, et inversement le programme du collège ne mentionne quasiment pas les acquis de l'école pour justifier sa progression. S'il est possible de constater quelques recouvrements thématiques entre le primaire et le secondaire inférieur (les propriétés de la matière, l'énergie, le mouvement des planètes), aucune continuité n'est revendiquée et celle qui existe ne peut apparaître que fortuite.

Dans ce cadre, il est remarquable que le seul point de convergence entre les deux programmes concerne la démarche d'investigation : sa description est similaire dans les deux contextes, en termes d'objectif, de fonction et d'opérationnalisation. La démarche d'investigation est le témoin des influences analogues qui imprègnent les concepteurs des programmes français du primaire et du secondaire, et auquel nous essayons de remonter dans cette section.

Dans la démarche d'investigation, les élèves prennent à leur charge l'avancée des savoirs : les « méthodes actives » en toile de fond

L'investigation, comme mise en situation de recherche de l'élève, n'est pas une nouveauté. Elle s'inscrit dans une tradition philosophique, portée par divers penseurs et pédagogues en faveur de méthodes actives pour l'apprentissage, dans le cadre des mouvements pour l'Éducation nouvelle du 20^{ième} siècle (E. Claparède, M. Montessori, A. Ferrière, C. Freinet, J. Dewey, J. Piaget, etc.). Malgré des variations importantes, ces approches ont en commun le rejet de l'idée que l'apprentissage s'assimilerait au transfert de connaissances qui passeraient de l'extérieur à l'intérieur de l'esprit de l'élève. Ces approches ont théorisé la nécessité de la participation active de l'élève dans son propre apprentissage (Coquidé, Fortin & Rumelhard, 2009 ; Bächtold, 2012). Les innovations pédagogiques fondées sur « l'enquête » promeuvent l'exploration du réel par le questionnement personnel, la recherche autonome et la prise d'initiative, la formulation d'explications, le tâtonnement expérimental, qui permettent à l'élève d'apprendre à penser : la connaissance est issue de l'action menée par l'élève et l'enseignant a pour mission d'organiser cette action.

Ces réflexions se retrouvent dans les études de didactique des sciences anglo-saxonnes au sein du courant lié à l'IBSE (inquiry-based science education), fortement influencé par la notion d'enquête développé par Dewey (pour une synthèse, cf. Anderson, 2002). Le texte officiel qui constitue la référence en la matière est le « National Science Education Standards », publié aux Etats-Unis en 1996 par le National Research Council. Celui-ci affirme que « Learning science is something students do, not something that is done to them » (p. 20) et plus loin :

« students should experience science in a form that engages them in the active construction of ideas and explanations » (p. 29)

Ces considérations ont également essaimées dans le monde francophone : à la suite de l'importation de l'expérimentation nord-américaine « Hands-On » rebaptisée « Main à la pâte » par Georges Charpak en 1996, le Plan de Rénovation de l'Enseignement des Sciences et de la Technologie à l'École (PRESTE, 2000), Bulletin officiel du ministère de l'Éducation Nationale, affirme que les élèves doivent « construire leur apprentissage en étant acteurs des activités scientifiques ». Le rapport Rocard (2007), commandé par la direction générale de la recherche de la Commission Européenne en 2007, précise le mode d'activité qui doit être privilégié en classe de sciences : l'investigation, la définition de l'investigation étant la suivante :

[L'investigation est] un processus intentionnel de diagnostic des problèmes, de critique des expériences réalisées, de distinction entre les alternatives possibles, de planification des recherches, de recherche d'hypothèses, de recherche d'informations, de construction de modèles, de débat avec les pairs et de formulation d'arguments cohérents (p. 9)

À l'international, en 2009, le programme Éducation de l'IAP (Inter Academy Panel), coordonné par Wynne Harlen et en collaboration avec l'Académie des sciences (France) et le Wellcome Trust (Royaume-Uni) a produit un rapport soulignant les avantages de la pédagogie fondée sur l'investigation :

« Il est avéré qu'un changement de pédagogie, passant de l'enseignement magistral passif à l'apprentissage actif via l'investigation, contribue de manière déterminante à améliorer l'enseignement des sciences et de la technologie » (Rapport Harlen & groupe de l'IAP, 2009, p. 4)

Ce bref résumé montre que les recherches des précurseurs liés aux « méthodes actives » du début du 20^{ième} siècle ont trouvé un écho favorable au sein des politiques éducatives européennes et internationales qui ont repris certaines de leurs facettes : l'importance de la mise en activité des élèves, la promotion de l'enquête ou l'investigation, la construction du savoir menée par l'élève.

La démarche d'investigation du programme français, en marquant le rôle actif de l'élève qui doit porter à sa charge l'essentiel de l'investigation, porte l'héritage de ces approches qui tentent de renouveler les méthodes pédagogiques de l'enseignement des sciences : « les méthodes actives » constituent la toile de fond de ce renouvellement.

La démarche d'investigation est de nature hypothético-déductive

La structure de la démarche d'investigation, telle qu'elle est présentée dans les textes institutionnelles suggère que la pratique sociale de référence des scientifiques a constitué une référence épistémologique importante : méthode de construction des savoirs et méthode de reconstruction de ces mêmes savoirs dans les classes suivraient donc des chemins parallèles. Pourtant, nous avons montré dans le chapitre précédent (cf. 2.1.1) que les philosophes et sociologues des sciences ont proposé plusieurs logiques potentielles de la découverte scientifique :

- l'inductivisme, qui apparaît dès l'aube de la science moderne dans les écrits des scientifiques émergents avance que les constructions théoriques constituent des généralisations des données d'observation et que celles-ci forment le point de départ de la démarche scientifique ;
- la méthode hypothético-déductive, formalisée par le physiologiste Claude Bernard au 19^{ième} siècle, se décline en plusieurs étapes dans lesquelles des hypothèses sont départagées par la confrontation avec des expérimentations ;
- l'analyse des structures de recherche, développée au 20^{ième} siècle, avance que les constructions théoriques s'insèrent au sein d'une structure plus vaste (paradigme selon Kuhn, programme de recherche selon Lakatos) qui définit un consensus général partagé à l'échelle d'une communauté de recherche ;
- l'anarchisme épistémologique promu par Feyerabend (1979) met en évidence la panoplie méthodologique plurielle et diversifiée effectivement à l'œuvre dans la progression scientifique et considère que l'enfermement méthodologique est dommageable au développement des sciences.

Au sein de la communauté des « penseurs des sciences », aucune logique ne s'est imposée mêmes si des consensus locaux existent. Or, malgré la diversité des modèles proposées de la pratique scientifique, les concepteurs des programmes français ont choisi de s'emparer d'une

unique référence : la méthode hypothético-déductive, en accord avec un empan important de la littérature de didactique des sciences francophone (pour une synthèse, cf. Cariou, 2010). Ce choix de transposition singulier peut être dû aux contraintes des pratiques de classe : la structure de la démarche hypothético-déductive (suite consécutive d'étapes qui aboutissent à un nouveau résultat scientifique) semble aisément « transposable » dans l'institution scolaire.

La démarche d'investigation est supposée amener les élèves à dépasser leurs conceptions initiales

La prise en compte des conceptions initiales des élèves afin d'initier leur dépassement s'enracine dans la théorie du changement conceptuel telle que proposée par Posner & al. (1982) dès le début des années 1980. Celle-ci affirme que les élèves possèdent a priori des représentations, idées ou modes de raisonnement à propos de différents phénomènes naturels (les « conceptions initiales »). Ces auteurs proposent des conditions nécessaires au changement conceptuel, dont la suivante : les conceptions actuellement utilisées par l'élève doivent être envisagées comme insatisfaisantes de son point de vue, d'où la nécessité de créer un conflit cognitif. Dans ce but, nous pouvons imaginer qu'en accord avec une partie de la littérature de didactique des sciences (Halloun & Hestenes, 1985 ; Vosniadou, 1994, Astolfi, 1992a), les conceptions initiales soient susceptibles de s'assimiler aux hypothèses imaginées par les élèves : le conflit cognitif serait alors créé par la réalisation de plusieurs expériences cruciales qui feraient office d'anomalies et qui invalideraient les conceptions initiales.

Dans le même ordre d'idée, une autre source d'inspiration d'origine francophone peut être évoquée : la présence des termes « situation-problème » et « objectif cognitif » (MEN, 2008b, p. 4) semble se référer à la conception discontinuiste de l'apprentissage défendue par Bachelard. Selon cet auteur, lorsque l'esprit humain s'applique à comprendre les phénomènes du monde naturel, il est déjà encombré d'une multitude de préjugés, liés à la culture dans laquelle il baigne. La transition de la pensée commune à la pensée scientifique commence donc toujours par une rupture épistémologique : la situation-problème, situation paradoxale et/ou contre-intuitive du point de vue des élèves, qui constitue la première étape de la démarche d'investigation, s'emploie à aménager cette rupture.

Conclusion

La démarche d'investigation dans le programme français de l'école obligatoire se trouvent donc au croisement d'influences diverses : le rôle actif de l'élève qui doit porter à sa charge l'essentiel de l'investigation, porte l'héritage des méthodes pédagogiques dites « actives », valorisées énergiquement par les politiques éducatives internationales depuis quelques dizaines d'années ; le dépassement des conceptions initiales prend sa source dans la théorie du changement conceptuel et la situation-problème reflète une conception bachelardienne discontinuiste de l'apprentissage. Quant à la succession des étapes de la démarche, sa référence est un modèle hypothético-déductif de la pratique scientifique.

Au niveau épistémologique, la consistance interne de ce syncrétisme a été peu explorée. Au niveau didactique, il est évident que l'introduction de la démarche d'investigation modifie les dynamiques de construction du savoir au sein des salles de classe : certains de ces effets sont

analysés dans plusieurs études (Calmettes, 2012 ; Marlot & Morge, 2016 ; Venturini & Tiberghien, 2012b).

3.2 L'enseignement des savoirs liés aux phénomènes physiques au primaire et au secondaire en Suisse romande

3.2.1 Organisation générale de l'enseignement des sciences physiques en Suisse romande

En Suisse romande, au primaire supérieur (cycle 2 – élèves de 8-12 ans), les savoirs liés aux phénomènes physiques sont enseignés au sein de la discipline « Phénomènes naturels et techniques » par un enseignant polyvalent. L'ensemble des disciplines relatives aux sciences expérimentales (« Phénomènes naturels et techniques », « Corps humain » et « Diversité du vivant ») bénéficie d'un enseignement d'une heure et demie hebdomadaire (deux périodes) pendant les années scolaires du primaire supérieur.

Au secondaire inférieur (cycle 3 – élèves de 12-15 ans), les savoirs liés aux phénomènes physiques sont enseignés au sein de la même discipline « Phénomènes naturels et techniques » par un enseignant spécialiste. Dans le canton de Genève, l'enseignement de la discipline bénéficie d'une heure et demi hebdomadaire obligatoire en 11^{ième} du cycle d'orientation (deux périodes), quelle que soit la section choisie.

Le savoir à enseigner est communiqué aux enseignants à travers une série de textes (le Plan d'Études Romand : PER) qui sont publiés par la Conférence intercantonale de l'instruction publique de la Suisse romande et du Tessin¹¹. Les enseignants du primaire supérieur ont à leur disposition le PER du domaine « Mathématiques et Sciences de la Nature – cycle 2 » (MSN 26, 2011) mais aussi le PER des domaines « Formation Générale – cycle 2 » (FG, 2011) et « Capacités Transversales » (CT, 2011). Les enseignants du secondaire inférieur ont à leur disposition le PER du domaine « Mathématiques et Sciences de la Nature – cycle 3 » (MSN 36, 2011) mais aussi le PER des domaines « Formation Générale – cycle 3 » (FG, 2011) et « Capacités Transversales » (CT, 2011). En 2011, pour le cycle 3, le PER était accompagné de moyens d'enseignement cantonaux¹² (MEC) constitués de plusieurs documents qui fournissent une progression détaillée des enseignements / apprentissages à travers l'enchaînement de situations que l'enseignant est supposé proposer aux élèves. Il était recommandé aux enseignants du cycle 3 de fonder leur enseignement sur les ressources cantonales, sans caractère d'obligation.

3.2.2 Analyse du document institutionnel de référence pour les sciences physiques au primaire et au secondaire inférieur : le PER 2011

Le PER, promu en 2011, avait l'objectif principal de proposer une formation unifiée à tous les élèves romands de l'école obligatoire. En sciences, l'unification ne s'arrête pas là puisque le PER affiche une forte continuité entre le primaire supérieur et le secondaire inférieur. D'abord,

¹¹ Lien du PER Sciences de la Nature : <https://www.plandetudes.ch/web/guest/sciences-de-la-nature/>

¹² Dès 2016, des moyens d'enseignement communs à la Suisse romande ont été introduits.

les dénominations des domaines d'étude sont similaires : tout au long de la scolarité obligatoire, les élèves étudient les « Phénomènes Naturels et Techniques », le « Corps humain » et la « Diversité du vivant » dans le cadre des Sciences de la nature. Remarquons d'ailleurs que les références aux disciplines académiques telles que la physique, la chimie, la biologie, la géologie sont absentes au profit d'un autre découpage des savoirs des sciences de la nature, qui se maintient tout au long de la scolarité obligatoire. Ensuite, les enseignants du primaire et du secondaire ont accès à des recommandations générales identiques et ils sont donc soumis aux mêmes exigences en termes d'objectifs d'enseignement des sciences. Enfin, la structure et la syntaxe des textes se recoupent en grande partie, notamment au niveau des thèmes abordés et de la présentation des éléments d'une démarche scientifique à acquérir. Nous prenons donc l'option de présenter globalement le PER, tout en précisant au fur et à mesure les déclinaisons qu'il peut prendre en fonction du niveau considéré (primaire ou secondaire).

Le PER 2011 se décompose en deux parties distinctes : des « commentaires généraux » communs à l'ensemble des disciplines scientifiques (Mathématiques, Phénomènes naturels et techniques, Diversité du vivant, Corps humain), suivis d'une progression des enseignements / apprentissages au fil des quatre années du primaire ou des trois années du secondaire inférieur.

Enjeux et objectifs principaux de l'enseignement des sciences

La première partie, que nous nommons « Recommandations générales » par symétrie avec les programmes français, s'étale sur 4-5 pages. Elle développe les enjeux et objectifs principaux de l'enseignement des sciences :

- L'enseignement des sciences est d'abord censé donner aux élèves des outils qui leur permettent de comprendre et de rendre compte du monde environnant :
 - « Le domaine *Mathématiques et Sciences de la nature* fournit à l'élève des instruments intellectuels d'appréhension et de compréhension du réel » (MSN, 2011, p. 7).
- Cet enseignement doit également contribuer au développement de capacités spécifiques à la discipline, qui s'inspirent de celles maîtrisées par la communauté scientifique :
 - « Le domaine vise, à permettre aux élèves, d'identifier des questions, de développer progressivement la capacité de problématiser des situations, de mobiliser des outils et des démarches, de tirer des conclusions (...) » (MSN, 2011, p. 7).
- L'enseignement des sciences doit aussi favoriser la maîtrise de capacités transversales
 - « Face aux évolutions toujours plus rapides du monde, il est nécessaire de développer chez tous les élèves une pensée conceptuelle, cohérente, logique et structurée, d'acquiesce d'esprit (...) » (MSN, 2011, p. 7).

Cet objectif transparaît dans un paragraphe dévolu entièrement aux « Capacités transversales » (MSN, 2011, p. 10) qui renvoie à une section du PER du même nom (CT), dans laquelle on trouve les entrées « Collaboration », « Communication », « Pensée créatrice », etc.

- L'enseignement des sciences est censé encourager les élèves à prendre conscience de certaines conséquences de leurs décisions quotidiennes :

« Par un questionnement sur le monde qui les entoure, on favorise chez eux une prise de conscience des conséquences de leurs actions sur leur environnement » (MSN, 2011, p. 7).

- Cet enseignement doit également favoriser la compréhension des controverses sociétales liées à des thématiques scientifiques :

« Il est important que chacun possède des outils de base lui permettant de comprendre les enjeux des choix effectués par la communauté, de suivre un débat sur le sujet (...) » (MSN, 2011, p. 7).

Cet objectif transparait également dans un paragraphe dévolu à la « Formation générale » (MSN, 2011, p. 10) qui renvoie à une section indépendante du PER (FG), et dont les entrées thématiques (« Santé et bien-être », « Interdépendances sociales, économiques, environnementales », « Vivre ensemble et exercice de la démocratie », etc.) se prêtent facilement à un enseignement qui réserve une place importante aux relations entre les sciences et techniques, la société et l'individu.

- Enfin, un objectif de l'enseignement des sciences se situe au niveau de la langue de scolarisation, dont il est censé développer la maîtrise autant à l'oral à travers la pratique du débat qu'à l'écrit à travers l'orthographe et la syntaxe.

Les objectifs développés dans les recommandations générales sont nombreux et se font le reflet de différents enjeux sociétaux à l'œuvre derrière la réduction du curriculum. Nous y reviendrons lors de la comparaison avec les programmes français.

Progression thématique des enseignements en physique

Dans la discipline « Phénomènes naturel et techniques », la deuxième partie du PER se concentre sur la progression thématique des enseignements / apprentissages en sciences physiques au fil des quatre années du primaire ou des trois années du secondaire inférieur. Pour chacun des deux niveaux, elle se présente sous la forme d'un tableau qui met en regard une « Progression des apprentissages », avec des « Attentes fondamentales » qui traduisent les exigences minimales requises en fin de cycle et des « Indications pédagogiques » à destination des enseignants. Elle est découpée en deux sections : la première section concerne le « développement de la démarche scientifique » et la deuxième est relative aux entrées thématiques de la discipline (électricité, mécanique, etc.).

Dans la suite, nous nous concentrons d'abord sur les points communs entre le primaire et le secondaire (la démarche scientifique, les entrées thématiques) avant d'approfondir leurs différences (la modélisation au secondaire, les savoirs propositionnels et l'ouverture sur l'extérieur de la salle de classe au primaire).

La « démarche scientifique » : un enjeu longitudinal au primaire et au secondaire inférieur

Dans le PER, la « démarche scientifique » est présentée sous la forme d'une liste de capacités méthodologiques qui semblent inspirées de la pratique des scientifiques : formaliser une question ou une problématique, émettre des hypothèses, mettre en place un processus d'expérimentation, etc.

Ces capacités sont progressivement approfondies du début de l'école primaire jusqu'à la fin du secondaire inférieur. Nous voyons, par exemple, sur la Figure 10, comment la capacité relative à la formulation d'hypothèses évoluent : de « L'élève formule au moins une question et/ou une hypothèse qui utilise(nt) les éléments de la situation au sujet d'une problématique » au primaire (à gauche), on en vient à « L'élève, face à une situation, énonce une hypothèse pertinente/des hypothèses pertinentes » au secondaire (à droite). Plus généralement, les exigences attendues des élèves s'affermissent progressivement du primaire au secondaire en même temps que leur marge d'autonomie est censée s'accroître. L'exposition de la démarche scientifique témoigne d'une réelle continuité tout au long de l'école obligatoire.

À un autre niveau d'analyse, nous constatons que la « démarche scientifique » ne se présente pas vraiment comme une méthode de reconstruction des savoirs scientifiques dans la classe mais plutôt comme une série de « capacités » élémentaires dont la reconstitution pour former un puzzle cohérent en classe est à la charge de l'enseignant. Peu d'indications lui sont fournies à propos de l'enchaînement des « capacités » au sein d'une tâche donnée : Faut-il mettre en œuvre l'ensemble des « capacités » à travers une démarche globale ? Est-il possible de les faire travailler indépendamment ? Que prend finalement en charge l'élève dans un cas ou dans l'autre ? L'exposition disjointe des « capacités » nous permet de conclure que l'objectif n'est pas tant de faire agir l'élève dans le cadre de la mise en œuvre d'une démarche globale que de le confronter, le plus souvent possible au cours de la scolarité obligatoire, avec un échantillon étendu de capacités dérivées de celles employées par la communauté de référence. Nous approfondirons ce point à la lumière de la comparaison Suisse romande-France.

Attentes fondamentales

Au cours, mais au plus tard à la fin du cycle, l'élève...

...formule au moins une question et/ou une hypothèse qui utilise(nt) les éléments de la situation au sujet d'une problématique

...choisit une piste de recherche, un dispositif d'exploration qui permet de répondre à une question de recherche (dans une liste de propositions)

...met en évidence quelques facteurs (des variables et des constantes) intervenant dans l'explication d'une problématique

...face à une situation, énonce une hypothèse pertinente/des hypothèses pertinentes **Niv. 2**

...imagine une expérimentation qui ne fait varier qu'un facteur à la fois

...prépare et/ou réalise un protocole d'observations, de mesures et de calculs pour un problème à deux facteurs dépendants (*mesure de température de l'eau en fonction du temps de chauffage, distance en fonction du temps,...*)

...structure et présente les résultats, en utilisant les arrondis et unités adéquats, dans un tableau/une représentation graphique (diagramme cartésien, en colonne, circulaire) **Niv. 2**

Figure 10 : Extrait du PER à propos de la démarche scientifique. Au primaire : à gauche (MSN 26, 2011, p. 33)/Au secondaire : à droite (MSN 36, 2011, p. 39)

Continuité des entrées thématiques au primaire et au secondaire

La répartition et la succession des entrées thématiques font preuve d'une cohérence et d'une continuité importantes sur l'ensemble de la scolarité obligatoire : les thèmes « Propriétés de la matière », « Mécanique », « Électricité » et « Énergie » sont peu à peu développés du début de l'école primaire à la fin du secondaire (cf. Figure 11).

D'autre part, le PER favorise l'étude de phénomènes scientifiques familiers aux élèves : l'enseignement scientifique doit leur permettre de rendre compte des faits auxquels ils sont accoutumés, à travers l'étude du fonctionnement de petits outils technologiques au primaire (casse-noix, fouet mécanique, sonnette, pendule, etc.) ou la modélisation de situations usuelles au secondaire (l'ébullition de l'eau, l'arc-en-ciel, les combustions, etc.). Ce parti-pris imprègne fortement le plan d'études, autant au primaire qu'au secondaire et le plan d'études va jusqu'à affirmer à plusieurs reprises que c'est lui qui a contraint la nature des savoirs introduits :

« Une perception correcte des phénomènes de la vie quotidienne nécessite une base de connaissances scientifiques, notamment sur les thèmes de la matière, de la mécanique, de l'électricité, de l'énergie et des couleurs. Dans cette perspective, les grandeurs étudiées sont la masse, le volume, la température, la pression, etc. » (MSN 36, p. 38).

Explorons à présent les différences significatives qui apparaissent entre le primaire et le secondaire, en se basant sur un exemple relatif aux propriétés de la matière (cf. Figure 11).

Attentes fondamentales
Au cours, mais au plus tard à la fin du cycle, l'élève...
...identifie les changements d'état de l'eau et certaines de ses caractéristiques concernant son aspect, son volume, sa température
...décrit le cycle naturel de l'eau
...sait que l'air est une matière
...cf. Attentes liées au <i>Développement de la démarche scientifique</i>

Attentes fondamentales
Au cours, mais au plus tard à la fin du cycle, l'élève...
...représente la matière par des molécules et des atomes
...classe « atome », « molécule », « homme », « Terre », « système solaire », « galaxies », « Univers » sur une échelle de dimension et en donne un ordre de grandeur Niv. 2
...identifie une substance à partir de mesures de masse et de volume
...utilise un modèle moléculaire pour interpréter les caractéristiques des états de la matière
...utilise un modèle moléculaire pour interpréter ou prévoir l'évolution de phénomènes physiques : dilatation, diffusion dans les liquides et les gaz, changement de température

Figure 11 : Extrait du PER à propos des propriétés de la matière. Au primaire : à gauche (MSN 26, 2011, p. 37)/Au secondaire : à droite (MSN 36, 2011, p. 41)

Au primaire : savoirs propositionnels et ouverture sur l'extérieur de la classe

Au primaire, les attentes vis-à-vis des élèves sont peu nombreuses et concentrées sur la mémorisation de savoirs propositionnels :

« l'élève décrit le cycle naturel de l'eau »

« l'élève sait que l'air est une matière » (Figure 11, à gauche)

D'autre part, le plan d'études promeut les connexions pouvant être établies entre l'enseignement des sciences et « l'extérieur » de la salle de classe. Par exemple, il est possible de lire dans les indications pédagogiques du thème « Matière » :

« Cette problématique [la matière] permet aussi une réflexion sur l'utilisation de l'eau par l'Homme. (...) Un tri des matières utilisées à domicile pourra être réalisé en fonction de leur potentiel de recyclage. L'expérimentation des mélanges est un bon point de départ pour aborder la notion de pollution. » (MSN 26, p. 37).

Ce mouvement d'ouverture est susceptible de mener à une considération accrue des problématiques quotidiennes et sociétales liées aux sciences et techniques.

Au secondaire : primauté de la modélisation

Au secondaire, les exigences vis-à-vis des élèves se modifient radicalement. Les élèves sont supposés exercer des compétences de modélisation, c'est-à-dire être capable de construire,

d'affiner ou d'utiliser des modèles scientifiques pour expliquer et prévoir des faits du monde empirique :

« L'élève utilise un modèle moléculaire pour interpréter ou prévoir (...) la dilatation, la diffusion dans les liquides et les gaz, changement de température (...) » (cf. Figure 11, à droite).

Cette prégnance de la modélisation se retrouve dans l'entièreté du plan d'études du secondaire, en se déclinant suivant le thème considéré (« modèle de la réaction chimique », « modèle trichromique », « modèle circulatoire du courant », « modélisation des chaînes de transfert d'énergie », etc.). À chaque fois, les modèles cités sont placés en vis-à-vis des phénomènes physiques qu'ils sont censés expliquer. La syntaxe du plan d'études présente la particularité de maintenir ensemble, dans un mouvement intégratif, outils théoriques, faits expérimentaux et savoir-faire propres aux sciences.

Les moyens d'enseignement genevois (2010) renforcent cette mise en avant de la modélisation en affirmant que le cours relatif aux propriétés de la matière vise essentiellement à :

Faire acquérir aux élèves une certaine aisance dans l'utilisation d'un modèle moléculaire pour prévoir et expliquer des phénomènes observés à l'échelle humaine. (p. 1)

L'insistance sur l'usage de ce terme est donc soutenue par l'ensemble des ressources officielles dont disposent les enseignants du secondaire, ce qui n'est pas surprenant puisque les concepteurs des plans d'étude et ceux des moyens d'enseignement genevois se recoupent partiellement.

Conclusion

En sciences physiques, le plan d'études affiche une certaine continuité entre le primaire et le secondaire inférieur tant au niveau des recommandations générales, que des thèmes abordés et de la présentation des éléments de démarche scientifique. De plus, les connaissances et démarches amenés en classe sont destinés à être appliqués prioritairement aux phénomènes de la vie quotidienne : le nouveau regard scientifique porté sur des faits anciennement connus amène les élèves à prendre conscience de l'intelligibilité du monde.

Cependant, ce que recouvre le plan d'études se décale au fil des cycles : au primaire, les savoirs sont introduits en faisant appel à toutes les facettes de l'expérience quotidienne d'un jeune enfant tandis qu'au secondaire, apparaît une véritable disciplinarisation des actes d'enseignement, à travers la mise en place de modalités spécifiques d'accès à la connaissance (isolement d'un phénomène pour le modéliser et ainsi, proposer une explication ou une prévision).

3.2.3 Conclusion

Les objectifs de l'enseignement scientifique

Dans les recommandations générales, les objectifs de l'enseignement des sciences concernent l'élucidation des événements du monde naturel à l'aide des concepts et des savoir-faire relevant

d'une démarche scientifique, la prise de conscience de l'impact des décisions quotidiennes à l'échelle individuelle et collective et enfin la compréhension des tenants et aboutissants des controverses sociétales liées aux sciences et technologies.

La spécificité d'ouverture de la classe sur le monde extérieur mise en avant au primaire laisse une part importante aux interconnexions sciences-société et rend ce cycle plutôt cohérent au niveau des objectifs tels qu'ils apparaissent dans les recommandations générales d'une part et dans le tableau de progression des apprentissages d'autre part. Inversement, le secondaire affiche un décrochage sur ce point puisque le tableau de progression des apprentissages ignore les enjeux relatifs aux problématiques sociétales liées aux sciences et technologies.

Au primaire et au secondaire : La « démarche scientifique »

La « démarche scientifique » est présentée sous la forme d'une liste de capacités méthodologiques qui semblent créées à partir d'un découpage systématique de la pratique des scientifiques. Le plan d'études ne fournit pas d'ordre particulier ni de mode d'emploi contraignant l'utilisation de ces différentes capacités pour engager un processus de reconstruction des savoirs en classe.

Nous reviendrons plus bas sur les origines de cette élémentarisation de la pratique des scientifiques dans l'enseignement des sciences à travers la comparaison avec les programmes français, qui use de la même rhétorique dans le tableau à trois colonnes.

Au secondaire : la « modélisation »

Dans l'ensemble des documents prescriptifs du secondaire, les élèves sont censés faire preuve d'aptitudes de modélisation afin d'interpréter des phénomènes particuliers (fonctionnement d'un moteur, combustion, évaporation, etc.) sur la base de connaissances déjà-là (modèle des transferts d'énergie, modèle de la réaction chimique, modèle moléculaire, etc.).

La configuration de la modélisation dans les textes emprunte, de notre point de vue, à certains travaux de didactique des sciences francophones déjà cités dans et dont nous résumons les grandes lignes :

- Tiberghien (1994) distingue deux niveaux de connaissance qui apparaissent en classe de sciences physiques : le « monde des théories et des modèles » et le « monde des objets et des évènements » (cf. 2.1.1)
- À partir du même découpage, des ingénieries didactiques fondées sur la confrontation entre constructions théoriques et faits expérimentaux ont été développées (Larcher, Chomat & Méheut, 1990 ; Séré, 1992 ; Genzling, 1988 entre autres). Ces ingénieries s'affichent souvent sous la forme d'une succession d'activités de structure similaire : présentation d'un modèle primitif – introduction d'un phénomène – application/enrichissement du modèle primitif afin d'expliquer le phénomène et/ou de prédire son évolution – introduction d'un nouveau phénomène – application/enrichissement du modèle qui a déjà été complété à l'étape précédente – etc. Cette manière de reconstruire le savoir dans la classe s'appuie donc sur une structure « cyclique » de l'avancée des savoirs (cf. 2.2.3).

Ces résultats de didactique des sciences (la théorie des deux mondes, d'une part et les ingénieries didactiques cycliques basées sur la modélisation, d'autre part) semblent constituer les références didactiques privilégiées par rapport à l'introduction de la modélisation dans le plan d'études romand.

3.3 Comparaison interinstitutionnelle de l'enseignement des savoirs liés aux phénomènes physiques en France et en Suisse romande

3.3.1 Des convergences entre les contextes suisse-romand et français

Nous explorons d'abord les convergences entre les contextes suisse-romand et français qui apparaissent à la suite de l'étude de chacun des curriculums.

Remarques générales

De façon très générale, les contextes scolaires français et suisse-romands bénéficient de conditions d'enseignement et d'apprentissage comparables : le volume horaire assigné aux sciences, les injonctions institutionnelles sous forme de textes officiels, les ressources à disposition mais aussi les conditions matérielles d'enseignement forment un arrière-plan commun qui autorise la possibilité même d'une comparaison interinstitutionnelle de l'enseignement des sciences physiques, qui constituent notre section d'étude dans cette thèse.

Les objectifs de l'enseignement des sciences au secondaire : tensions entre les recommandations générales et la progression des enseignements

Au secondaire, une première convergence entre les deux contextes concerne le manque de cohérence entre les recommandations générales qui appellent à un enseignement des sciences ouvert sur des aspects relatifs à la vie quotidienne et aux controverses sciences-société, d'une part et un corps du programme ou du plan d'études dans lesquels ces aspects disparaissent pour laisser la place à un enseignement de tradition purement académique, d'autre part.

La récurrence de cet effet dans les deux contextes interroge sur les racines éventuellement communes à ce phénomène. Une analyse a été menée ailleurs sur ce point (Marty, Venturini & Almqvist, 2018) : les deux systèmes éducatifs s'inscrivent dans la lignée des idées produites par les Lumières (Kintzler, 1984 ; Hofstetter, 1998), notamment celle de « l'instruction publique » de Condorcet. Dans ce cadre, l'objectif primordial de l'enseignement est de former les élèves à l'exercice de leur propre raisonnement en leur transmettant des connaissances scientifiques, philosophiques, littéraires et historiques. Selon ce point de vue, le système scolaire devrait se limiter à donner aux étudiants un ensemble d'outils intellectuels qui formeront la base de leur autonomie et de leur émancipation en tant que citoyens :

[Selon Condorcet], le système scolaire devrait être indépendant de tout pouvoir politique ou groupe de pression de la société civile. Il ne devrait pas chercher l'utilité immédiate (...). La transmission de la connaissance, qui est la responsabilité du gouvernement public prévaut sur l'éducation morale qui devrait rester une affaire privée. (Eliard, 1993, p. 59-60).

Condorcet fait donc la distinction entre l' « instruction publique » basée sur l'usage de la raison, et qui, selon lui, relève des prérogatives de l'école et l' « éducation » qui appartient au domaine des valeurs morales, politiques et religieuses. Cette vision a été l'inspiration principale des valeurs fondatrices de « l'école républicaine » tout au long du 19^{ème} siècle en France et en Suisse romande (Buisson, 2012 ; Dubois, 2002), même si le succès de sa mise en œuvre reste sujet à débat (Lelièvre 2002 ; Hofstetter & Perisset Bagnoud, 1998).

Dans ce contexte, le décrochage observé dans les textes institutionnels entre les recommandations générales et le corps du programme peut s'interpréter de deux manières non indépendantes : d'abord, il est possible que les recommandations générales fournissent non pas des exigences pratiques à interpréter au pied de la lettre par les enseignants mais un aperçu des bénéfices spontanés que l'enseignement des sciences procurera aux élèves en considérant les effets sur le long terme. Certaines tournures de phrases présentes dans les textes institutionnels soutiennent cette interprétation :

La compréhension des relations étroites entre les conditions de milieu et les formes de vie, ainsi que la prise de conscience de l'influence de l'Homme sur ces relations, conduisent *progressivement* à mieux connaître la place de l'Homme dans la nature et *prépare la réflexion sur* les responsabilités individuelles et collectives dans le domaine de l'environnement, du développement durable et de la gestion de la biodiversité (MEN, 2008b, p. 3)

Ensuite, l'écriture distendue des recommandations générales et du corps des programmes peut aussi s'interpréter comme une tentative de conciliation entre les politiques éducatives européennes qui promeuvent l'alphabétisation scientifique (« scientific literacy ») au service des questions vives sur les relations entre sciences et société et les conceptions plus classiques de l'enseignement scientifique, comme une transmission de savoirs socialement légitimés et dont l'acquisition est évaluable dans les pratiques scolaires. Cette dernière conception est à l'œuvre dans les politiques scolaires suisse-romandes et françaises depuis la mise en place de l'école publique obligatoire.

Les capacités : Une élémentarisation de l'activité scientifique de référence

À l'école obligatoire, une deuxième convergence concerne la présence des « capacités » dans les curriculums. Celles-ci sont formées à partir d'une élémentarisation de l'activité scientifique de référence :

- En France, la deuxième colonne du tableau laisse ainsi apparaître les capacités, telles que « Valider ou invalider une hypothèse », « Proposer une expérience », « Suivre un protocole donné », « Contrôler et exploiter des résultats », etc.
- En Suisse romande, la démarche scientifique s'affiche comme une juxtaposition de capacités, telles que « Formulation de quelques questions et hypothèses au sujet d'une problématique », « Développement de stratégies d'exploration et /ou d'expérimentation », « Relevé fidèle des résultats, des observations et /ou des mesures effectuées », etc.

La manière dont ces briques dérivées de l'activité scientifique sont configurées dans les curriculums est susceptible de renvoyer à la « pédagogie par objectifs » et la « pédagogie par compétences » (Carette & Rey, 2010).

En s'inspirant de la psychologie béhavioriste et du morcellement des tâches de production à l'œuvre dans l'organisation du travail, la pédagogie par objectifs propose un découpage de l'apprentissage en sous-unités aussi petites que possibles, chacune à la portée de l'élève, avant de réassembler ces unités pour reconstituer une tâche globale : c'est exactement ce que propose le programme français dans lequel les capacités renvoient aux sous-unités de l'activité de référence tandis que la démarche d'investigation met bout à bout ces capacités pour la reconstituer dans son intégralité. De plus, cette décomposition en éléments discrets permet d'organiser le curriculum sur de longues périodes à travers une approche systémique et rationnelle de l'activité des élèves : nous avons d'ailleurs remarqué qu'en Suisse romande, les capacités sont progressivement approfondies du début de l'école primaire jusqu'à la fin du secondaire inférieur.

Les deux curriculums laissent également apparaître un lien de parenté avec « la pédagogie par compétences ». Apparue dans un contexte professionnel et économique, la notion de « compétence » visait à dépasser celle de « qualification », en mettant davantage l'accent sur l'autonomie, la flexibilité et la prise de décisions des salariés devant des situations complexes et inédites. Reprise et popularisée dans le domaine de l'éducation, des projets portés par de grandes organisations internationales (projet DeSeCO de l'OCDE¹³, programme « Education et Formation 2010¹⁴ » de l'UE), préconisaient le développement de plusieurs compétences-clés que tout citoyen a intérêt à développer afin de faire face aux exigences des demandes sociales actuelles. C'est dans ce cadre que nous retrouvons dans les curriculums français et suisse-romands de nombreuses capacités « génériques » qui débordent du cadre strict des sciences physiques, telles que « mettre en œuvre un raisonnement » ou « extraire des informations d'un document ».

L'élémentarisation de l'activité de référence des scientifiques dans les curriculums français et suisse-romand apparaît en filiation avec les manières d'envisager l'enseignement à l'œuvre dans la « pédagogie par objectifs », apparue au début des années 1970 et la « pédagogie par compétences », apparue au début des années 1990.

3.3.2 Des spécificités transpositives : démarche d'investigation en France vs la modélisation en Suisse romande

Nous détaillons à présent les spécificités transpositives inférées de l'étude des curriculums : la démarche d'investigation au primaire et au secondaire en France, l'attention particulière accordée à la modélisation au secondaire en Suisse romande.

¹³ Definition and Selection of Competencies (DeSeCo). Consulté le 5 février 2018 sur <http://www.oecd.org/education/skills-beyond-school/definitionandselectionofcompetenciesdeseco.htm>

¹⁴ Consulté le 24 octobre 2018 sur https://www.consilium.europa.eu/uedocs/cms_data/docs/pressdata/fr/educ/107623.pdf

En France, la démarche d'investigation se présente comme un ensemble d'étapes mise en œuvre face à un problème et qui aboutit à l'institutionnalisation de nouvelles connaissances. Au cours de la démarche, les élèves sont censés formuler des hypothèses, imaginer un protocole d'expérience permettant de valider ou invalider les hypothèses, le mettre en œuvre, et enfin interpréter les résultats. La démarche d'investigation du programme français se trouve à la croisée de plusieurs influences : les méthodes pédagogiques dites « actives » ; la théorie du changement conceptuel appuyée par une conception bachelardienne discontinuiste de l'apprentissage ; un modèle hypothético-déductif de la pratique scientifique. Par contraste, en Suisse romande, si le plan d'études expose bien une liste de « capacités », il ne les envisage pas comme un processus global de reconstruction des connaissances dans la classe et ne détaille pas une répartition des responsabilités les concernant. Il est également intéressant de noter que le terme « conception »¹⁵ est totalement absent du plan d'études suisse-romand.

En Suisse romande, dans l'ensemble des documents prescriptifs du secondaire, les élèves sont censés faire preuve d'aptitudes de modélisation, c'est-à-dire être capable de construire, d'affiner ou d'utiliser des modèles scientifiques pour expliquer et prévoir des faits du monde empirique. L'attention particulière accordée à la modélisation prend sa source dans certains travaux de didactique des sciences francophones (Larcher & al., 1990 ; Chomat & al., 1988 ; Séré, 1992 ; Tiberghien & al., 2009). Par contraste, nous constatons que le programme français n'emploie jamais le terme de modèle ou de modélisation, même sur les thématiques relatives à la matière où les chercheurs en didactique des sciences francophones l'utilisent pourtant beaucoup : le programme français évoque plutôt la « description moléculaire » de la matière. (MEN, 2008b, p. 17)

3.4 Conclusion

À première vue, il existe bien une certaine proximité entre les textes curriculaires français et suisses-romands, autant au niveau du primaire que du secondaire. Dans les deux contextes, en sciences, il est souvent question d'engager les élèves dans une posture active où ils possèdent une certaine marge d'autonomie, de valoriser une approche de questionnement, de résolution de problèmes, d'investigation, de mise en perspective citoyenne. Nous avons essayé d'aller au-delà de cette vue superficielle et de montrer en quoi la façon dont ces termes ou tournures de phrase sont configurés dans chacun des textes curriculaires nous permet de remonter aux choix de transposition des deux contextes étudiés. Nous avons également essayé de remonter aux références épistémologiques, pédagogiques, didactiques, politiques de ces choix de transposition.

Certaines convergences entre les deux textes prescriptifs laissent entrevoir des visions communes pour un enseignement disciplinaire des sciences physiques : dans les deux cas, il existe un décrochage entre les enjeux présentés dans les recommandations générales et ceux présentés dans le corps du programme, décrochage qui reflète peut-être des tensions entre des

¹⁵ Le terme « représentation intuitive » est utilisé trois fois pour évoquer des obstacles précis pour les élèves : par exemple, en mécanique, selon la représentation intuitive des élèves, « l'état naturel d'un corps est l'état de repos » (MSN 36, 2011, p. 43)

politiques éducatives contradictoires ; dans les deux cas, il existe une certaine élémentarisation de l'activité scientifique de référence, affiliée, de notre point de vue, aux pédagogies « par objectifs » ou « par compétences ».

D'un autre côté, la comparaison des textes a permis d'établir des nuances suffisamment significatives dans la configuration des curriculums pour permettre d'établir des différences dans certains choix de transposition et de références associées, notamment au niveau de la démarche d'investigation (en France) et de la modélisation (en Suisse romande). Au contraire de la démarche d'investigation qui s'harmonise avec les politiques éducatives européennes, l'insertion de la modélisation, à la fois dans le plan d'études et les moyens d'enseignement, semble être une particularité de l'enseignement de la physique au secondaire en Suisse romande. Ses conséquences, au plan des conditions pour l'enseignement et l'apprentissage qu'elle produit, restent à explorer.

Chapitre 4 **PROBLÉMATIQUE ET QUESTIONS DE RECHERCHE**

Comme nous l'avons évoqué dans l'introduction, depuis quelques décennies, l'enseignement des sciences à l'école obligatoire fait l'objet de changements majeurs qui se posent en rupture avec un enseignement des savoirs de type transmissif. Il s'agit pour l'enseignant d'engager l'élève dans une posture active de découverte et d'exploration du monde qui l'entoure, attestée par une approche de questionnement, de résolution de problèmes, d'investigation. Les moyens préconisés pour favoriser cette posture s'inspirent de certains des modes d'élaboration des savoirs par les scientifiques. Cette approche repose plus ou moins explicitement sur l'idée que les savoirs scientifiques peuvent s'apprendre à l'école selon des procédures analogues avec celles de la production des savoirs au sein des communautés scientifiques. Nous avons décrit dans le Chapitre 1 quelques caractéristiques propres au fonctionnement du système didactique. Ainsi, l'articulation d'un contrat et d'un milieu permet la construction de nouveaux rapports aux objets par les élèves qui sont l'objet d'une négociation au cours de laquelle l'enseignant les oriente, les modifie ou en écarte certains en fonction d'un programme qu'il est le seul à connaître à l'avance. Aussi, nous souhaitons contribuer à répondre à la question suivante que nous trouvons fondamentale au regard de l'approche préconisée : *dans le cadre du fonctionnement d'un système didactique ainsi décrit, quel(s) contrat(s), milieu(x), quelles formes de négociations mises en œuvre par l'enseignant permettent aux élèves d'apprendre les sciences à la manière dont les scientifiques construisent les sciences dans les institutions de référence ?*

Plusieurs modèles de construction des savoirs scientifiques ont été mis en évidence par les philosophes, historiens et sociologues des sciences (cf. 2.1). À travers le processus de transposition externe, ces travaux constituent des sources d'inspiration potentielles pour les concepteurs des curricula qui s'efforcent de construire les programmes d'enseignement dans un certain rapport de ressemblance avec les épistémologies des pratiques scientifiques. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi d'explorer notre question centrale à travers l'étude des modalités de transposition mises en œuvre dans des contextes institutionnels distincts, qui interprètent différemment le postulat d'analogie entre apprentissage des savoirs scientifiques à l'école et production des savoirs au sein des communautés scientifiques, et dans lesquels les références en termes épistémologiques ou didactiques sont contrastées. Les programmes d'enseignement en France et les plans d'étude en Suisse romande se révèlent être des candidats intéressants dans cette optique. Nous avons montré dans le Chapitre 3 que le postulat précité est bien partagé dans les programmes français et les plans d'études suisses-romands mais qu'il est décliné de manière différente :

- En France, au primaire et au secondaire, la démarche d'investigation se présente comme un ensemble d'étapes mises en œuvre face à un problème et qui aboutit à l'institutionnalisation de nouvelles connaissances, l'ensemble du processus formant un tout cohérent. Guidés par l'enseignant, les élèves sont censés formuler des hypothèses, imaginer un protocole d'expérience permettant de valider ou invalider les hypothèses, le

mettre en œuvre, et enfin interpréter les résultats. La démarche d'investigation dans les programmes français se situe à l'intersection de plusieurs références : les méthodes pédagogiques dites « actives » ; la théorie du changement conceptuel ; un modèle hypothético-déductif de la pratique scientifique.

- En Suisse romande, au primaire et au secondaire, les élèves sont censés utiliser ou affiner des modèles scientifiques déjà-fournis pour expliquer et prévoir des faits du monde empirique. La considération accordée à la modélisation prend sa source dans certains travaux de didactique des sciences francophones (Larcher & al., 1990 ; Chomat & al., 1988 ; Séré, 1992 ; Tiberghien & al., 2009) dans lesquels l'activité des élèves consiste à établir des connexions entre deux niveaux de connaissance qui renvoient à deux « mondes » différents (le monde des théories et des modèles et le monde des objets et événements), à l'occasion de séquences « cycliques » d'enseignement.

Selon les programmes français, l'enseignant engage les élèves à imiter les procédures de référence en menant une démarche d'investigation ; le plan d'études suisse-romand recommande, pour sa part, de mener des activités de modélisation. Ces considérations nous permettent de spécifier la question centrale aux contextes de notre étude : **quels fonctionnements des systèmes didactiques nous révèlent l'analyse de pratiques d'enseignement scientifiques soumises à des modalités de transposition contrastées (en France et en Suisse romande) ? Quels phénomènes spécifiques d'enseignement / apprentissage nous permettent-elles de construire ?**

Nous avons choisi de développer deux dimensions du fonctionnement des systèmes didactiques analysés, en lien avec les particularités de la transposition de chaque contexte.

La première est l'élaboration d'une continuité entre les rapports aux objets construits par les élèves et ceux visés par l'enseignant, d'une part parce que cela nous semble constituer un indicateur pertinent pour qualifier la nature de l'expérience d'apprentissage des élèves, et d'autre part, parce que l'élaboration de cette continuité est censée s'opérer dans des conditions très différentes en Suisse romande et en France. Il est en effet possible de considérer que plus l'élève perçoit une continuité entre ce qu'il produit dans une situation donnée et ce que l'enseignant désigne, reprend et institutionnalise à partir du milieu de cette situation, plus les situations dans lesquelles il est plongé lui deviennent intelligibles. D'autre part, les modalités de transposition en France et en Suisse romande qui sont rappelées ci-dessus sous-entendent un cheminement très différent quant à l'élaboration de cette continuité :

- En France, la démarche d'investigation accorde beaucoup de responsabilité aux élèves dès le début. Devant un problème, ceux-ci sont censés imaginer des hypothèses permettant la mise au point de plusieurs protocoles d'expérimentation. Nous avons souligné que le terme d'« hypothèse » est polysémique au sein de l'institution « enseignement des sciences » mais dans tous les cas, ce sont les idées « naïves » ou pseudo-scientifiques des élèves qui sont censées constituer le point de départ de la démarche d'investigation. Comme ces idées ne sont pas contrôlées en amont par l'enseignant, elle peuvent être de nature très variée : elles laissent un espace important à l'expression d'une certaine

contingence dans le milieu. L'enseignant doit donc trouver le moyen de parcourir avec les élèves tout le chemin qui sépare les points de vue initiaux des élèves du point de vue scientifique : c'est à ces conditions que l'élaboration d'une continuité est susceptible de se construire.

- En Suisse romande, au secondaire, la situation est toute autre : les modèles scientifiques sont partiellement enseignés dès le départ, en court-circuitant les idées des élèves sur le sujet et en créant immédiatement un décalage avec leur point de vue. C'est l'application de ces modèles à des situations successives intégrant des phénomènes physiques de plus en plus variés qui est censée recréer de la continuité du point de vue des élèves, en leur donnant progressivement les moyens de percevoir le sens, la fonction et la portée des modèles scientifiques proposés au début. L'enseignant doit donc prévoir et aménager en amont la rupture inévitablement apportée par l'introduction du modèle de départ : c'est à ces conditions que l'élaboration d'une continuité est susceptible de se construire.

Puisque la construction d'une continuité entre le point de vue des élèves et le point de vue scientifique paraît constituer un indicateur pertinent pour qualifier la nature de l'expérience d'apprentissage des élèves et que les modalités de transpositions françaises et suisses-romandes présupposent des moyens très différents afin d'atteindre cette continuité, il est pertinent de se demander :

Q1 : Au sein de chaque contexte, quel degré de continuité entre les rapports aux objets construits par les élèves et ceux visés par l'enseignant est atteint ? Quels schémas d'action l'enseignant développe-t-il au cours de la négociation des rapports aux objets avec les élèves pour atteindre ce degré de continuité ?

Pour examiner comment s'élabore cette continuité, l'enquête consiste d'abord à caractériser la dialectique contrat/milieu en documentant la manière dont le milieu s'enrichit de nouveaux objets et de nouveaux rapports aux objets (mésogenèse) ; les responsabilités qu'enseignant et élèves prennent dans cet enrichissement du milieu (topogenèse) ; la manière dont ces rapports aux objets se transforment progressivement en savoirs institués au fur et à mesure du déroulement des tâches/activités (chronogenèse), le tout en prenant en compte la nature des savoirs en jeu, en référence à la théorie des deux mondes.

La deuxième dimension du fonctionnement des systèmes didactiques qui nous intéresse réside dans les formes d'épistémologie pratique des enseignants, car elle nous permet de donner du sens aux schémas d'actions de l'enseignant, en les rapportant à des facteurs externes aux pratiques de classe. L'analyse menée *in situ* afin de répondre à la question précédente (question Q1) permet de caractériser les décisions mises en œuvre par l'enseignant, et au final nous donne accès à son espace interprétatif des préconstruits formalisés dans les textes, c'est-à-dire à la façon dont il intègre les injonctions institutionnelles à ses pratiques de classe. Il est alors possible de se demander :

Q2 : Quelles formes d'épistémologie pratique peut-on observer lorsque l'enseignant tente d'intégrer les modalités de transposition propres au contexte français ou au contexte suisse-romand ?

Les réponses à ces deux questions nous paraissent pouvoir être approfondies en faisant intervenir un autre axe de comparaison. En effet, d'une part, les programmes français et plans d'études suisses ne laissent pas apparaître les mêmes caractéristiques au primaire et au secondaire. En France, la démarche d'investigation constitue un enjeu longitudinal qui traverse l'école obligatoire tandis qu'en Suisse romande, la focalisation sur la modélisation n'apparaît qu'à partir du secondaire. D'autre part, les prescriptions françaises et suisses-romandes font intervenir tant au primaire qu'au secondaire, des objets didactiques et épistémologiques complexes à appréhender ; on peut supposer que les enseignants polyvalents du primaire et les enseignants spécialistes du secondaire ne développent pas les mêmes rapports face à ces objets. Ces considérations suggèrent de possibles évolutions différentes des systèmes didactiques dans le primaire et le secondaire et une construction différente de la continuité dans l'avancée des savoirs. Ces éléments sont susceptibles de refléter des formes d'épistémologie pratique chez les enseignants du primaire distinctes de celles des enseignants du secondaire. **Cela nous amène à compléter les deux questions de recherche en les situant chacune à la fois au primaire et au secondaire.**

Au final, notre recherche conjugue plusieurs plans de comparaison interinstitutionnels :

- une comparaison entre les ordres d'enseignement primaire (où officie un enseignant polyvalent) et secondaire inférieur (où officie un enseignant spécialiste) ;
- une comparaison entre les pratiques en Suisse romande et en France

Enfin, en mettant à profit les réponses aux questions Q1 et Q2 que nous analysons dans une perspective comparatiste, nous essayons de dégager certaines dimensions génériques de l'action didactique relative à l'enseignement / apprentissage de la physique. :

Q3 : Quelles sont les conditions génériques d'une continuité entre rapports aux objets construits par les élèves et rapports aux objets visés par l'enseignant ? Comment ces conditions peuvent-elles être mises en relation avec le postulat analogique entre apprentissage des savoirs scientifiques à l'école et production des savoirs au sein des communautés scientifiques ?

Nous présentons à présent la méthodologie de travail pour répondre à nos questions de recherche.

Chapitre 5 DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE

Sur le plan méthodologique, la thématique des curriculums sur laquelle porte l'investigation constitue la première décision significative afin de répondre aux questions de recherche. Dans un premier temps, nous justifions le choix de considérer la thématique des propriétés de la matière.

Puis, dans un second temps, nous exposerons les principes méthodologiques de la recherche qui s'inspirent d'une part de la démarche clinique et expérimentale proposée par Leutenegger (2009) et d'autre part, de l'articulation des différents niveaux d'analyse proposée par Lemke (2001) et Tiberghien, Malkoun et Seck (2008).

Ensuite, dans un troisième temps, nous détaillerons les modalités du recueil des données, en développant l'idée que le système de traces se découpe en un corpus principal construit directement à partir des événements de la classe et d'un corpus annexe qui comprend des éléments associés à ces mêmes événements.

Enfin, dans un quatrième temps, nous entamerons les modalités de traitement des données en argumentant en faveur de la construction de deux nouveaux types de traces : la transcription et le synopsis. Nous proposerons une démarche d'identification d'extraits significatifs, au regard de nos questions de recherche. Nous indiquerons comment l'analyse de ces extraits, fécondée par l'analyse comparatiste, nous mène à l'élucidation des schémas d'action spécifiques de l'enseignant et des élèves dans chaque contexte et au-delà à la détermination de certains principes structurants de ces schémas actions, dont l'origine dépasse les pratiques *hic et nunc* de classe.

5.1 Le choix de la thématique : les propriétés de la matière

Nous avons choisi d'investiguer nos questions de recherche à travers la thématique des propriétés de la matière, en particulier des propriétés qui concernent l'état gazeux de l'eau et les changements d'état faisant intervenir cet état gazeux (ébullition, évaporation, condensation). Plusieurs raisons participent à ce choix :

- Des enjeux d'enseignement liés à cette thématique se retrouvent dans l'ensemble des contextes étudiés : en France au primaire, en Suisse romande au primaire, en France au secondaire inférieur et en Suisse romande au secondaire inférieur. La présence dans tous les contextes est bien sûr une condition utile pour mener à bien notre étude mais au-delà de cet aspect, son existence dans les quatre contextes démontre qu'il s'agit d'un objet incontournable dans l'étude des sciences physiques.
- Les phénomènes physiques en lien avec cette thématique sont largement répandus dans la vie quotidienne. Sans forcément savoir qu'il s'agit d'un changement d'état, la plupart des élèves ont déjà été témoin d'une ébullition de l'eau (à travers la cuisson des pâtes, par exemple) ; d'une évaporation (quand l'eau des flaques disparaît par grand soleil) ; d'une condensation (quand de la buée se dépose sur les fenêtres). Les élèves entament donc

l'étude des propriétés de la matière en disposant de rapports initiaux aux objets « buée », « flaque », peut-être aussi « ébullition » et « évaporation », ce qui veut dire que s'ils veulent apprendre des savoirs nouveaux, ils devront modifier ces rapports initiaux qui étaient suffisants pour répondre aux besoins de la vie quotidienne. Du côté de l'enseignement, les modèles qui correspondent à ces phénomènes sont très variés (des modèles très descriptifs jusqu'aux modèles abstraits qui font appel à une représentation particulière de la matière et qui sont souvent contre-intuitifs) et sont susceptibles de se référer à plusieurs domaines des sciences physiques (thermodynamique, mécanique, physique statistique, etc.). La banalité des phénomènes appartenant à cette thématique n'est pas garante d'un enseignement facilité. Le choix de cette thématique est donc justifié par la complexité des modèles à appréhender du point de vue des élèves et par la complexité de la mise en œuvre didactique, du point de vue de l'enseignant. Dans ces conditions, les pratiques didactiques devraient nous donner à voir de manière saillante la façon dont l'enseignant organise l'évolution des rapports des élèves aux objets du milieu afin qu'ils deviennent compatibles avec les enjeux de savoir visés, ce qui constitue l'objet de notre recherche.

- Enfin, de nombreuses études et recherches en didactique ont porté sur l'enseignement et l'apprentissage de l'état gazeux et des changements d'état faisant intervenir l'état gazeux (pour une recension non exhaustive, cf. 2.2). Ces études sont susceptibles d'être un apport précieux, notamment pour construire une analyse a priori des situations dans lesquelles sont placés l'enseignant et les élèves.

5.2 Positionnement de la démarche méthodologique

Les principes méthodologiques que nous choisissons doivent permettre de décrire et comprendre le fonctionnement du système didactique, considéré comme une unité théorique insécable, dans le cadre de séances de la pratique ordinaire.

5.2.1 L'inscription au sein d'une démarche clinique et expérimentale

Notre recherche s'inscrit dans une dimension clinique et expérimentale du didactique ordinaire telle que développée par Leutenegger (2000 ; 2003 ; 2009) et Schubauer-Leoni et Leutenegger (2002). La dimension expérimentale, qui vise à contrôler certains paramètres de la recherche sur le plan didactique, se perçoit à travers le « contrat de recherche » qui fixe les termes de la collaboration entre enseignant et chercheur : dans notre cas, nous demandons aux enseignants volontaires de nous montrer des séances ayant trait aux propriétés de la matière (plus particulièrement, les états et changements d'état de l'eau). Cette dimension expérimentale a pour enjeu de garantir un potentiel de comparabilité satisfaisant entre les quatre classes afin d'être en mesure de mener à bien une analyse ascendante de la transposition sur cet objet de savoir. Quant à la dimension clinique, elle repose sur des études de cas en contexte qui visent à reconstruire des « faits didactiques ». Cette reconstruction de « faits didactiques », qui prend son sens par rapport à notre questionnement de recherche passe d'abord par la constitution d'un système de traces :

« le dispositif de production de traces comprend à la fois l'observation des activités et donc du cours des actions (le système didactique en fonctionnement) mais aussi le récit (enregistré) anticipateur et/ou évocateur d'acteurs autorisés (participants, voire témoins oculaires des événements.) » (Schubauer-Leoni et Leutenegger, 2002, p. 241).

Nous ajoutons à cette liste d'autres types de traces, notamment toutes les traces écrites qui accompagnent la vie des savoirs dans la classe (productions écrites des élèves, préparations de l'enseignant, etc.) mais aussi des traces construites ad hoc pour les besoins de la recherche (transcriptions, synopsis). C'est la mise en correspondance des différentes traces qui permet de réduire l'incertitude quant à la compréhension des phénomènes didactiques, à la manière dont, en médecine, un tableau clinique permet de donner de la cohérence à un ensemble de symptômes, qui pris isolément ne sont pas suffisants pour délimiter le diagnostic d'une maladie. Dans notre cas, la corroboration d'une première hypothèse émise à partir d'un élément du corpus est rendue possible par le croisement avec d'autres types de traces qui traitent du même sujet. Par exemple, les entretiens jouent le rôle de discutant de certains phénomènes identifiés dans les séances de classe. Au final, cette technique de « triangulation des données » permet de s'assurer de la stabilité des résultats produits.

5.2.2 L'articulation des différents niveaux d'analyse

La collection des données, pour une classe, aboutit à plusieurs heures d'enregistrement des actions humaines en contexte à traiter. La question de la (ou des) échelle(s) de traitement des données se pose inévitablement. Plusieurs principes ont guidé notre méthodologie sur ce point.

Lemke (2001) développe l'idée que dans les systèmes sociaux, une analyse très détaillée au niveau microscopique ne permet pas aux chercheurs de structurer l'analyse à un niveau supérieur:

« Activities at higher levels of organisation are emergent, their functions cannot be defined at lower scales, but only in relation to still higher ones. [...] Going "up" we know the units, but we know neither the patterns of organisation nor the properties of the emergent higher-level phenomena » (p. 25)

En d'autres termes, l'orientation générale des pratiques d'enseignement et l'apprentissage ne peut pas être inférée par addition de l'étude de plusieurs petits événements significatifs, même en tenant compte de régularités statistiques : l'émergence de la structuration à un niveau supérieur impose le développement d'outils qui parviennent à la saisir directement à partir des données brutes. Cette idée aboutit à la constitution de plusieurs types d'analyse : une analyse qui correspond au niveau microscopique et une (ou plusieurs) analyse(s) qui correspondent à des niveaux supérieurs. Nous défendons que l'aller-retour entre les analyses de différents niveaux est indispensable pour reconstituer le fonctionnement du système didactique ; il convient alors de trouver des moyens de mettre en correspondance ces deux types d'analyse.

À la suite de Tiberghien, Malkoun et Seck (2008), nous distinguons trois échelles – macroscopique, mesoscopique et microscopique qui incluent à la fois le temps et la granularité

du savoir. Ces échelles sont adaptées à la taille de notre corpus. Ainsi, sans ignorer que le chercheur rentre dans la classe au milieu d'une organisation plus vaste et qu'il procède sur un échantillonnage limité, nous considérons que :

- le niveau macroscopique correspond à l'ensemble de la partie enregistrée pour une classe donnée, typiquement quelques séances qui couvrent parfois une séquence d'enseignement entière. Le niveau macroscopique reflète les grands enjeux de savoir que l'enseignant projette d'atteindre dans la séquence. Il donne à voir la manière dont l'enseignant transite d'un enjeu de savoir à l'autre, en termes de complexification progressive, de cohérence ou d'indépendance.
- le niveau mésoscopique est construit de telle manière qu'il se situe à l'interface des niveaux supérieur et inférieur : il résume les étapes prévues pour atteindre un enjeu de savoir donné. Il correspond en général à quelques dizaines de minutes.
- le niveau microscopique est construit de telle manière qu'il donne à voir le processus de co-construction des savoirs à travers les interactions enseignant-élèves. Il correspond à un extrait de quelques minutes.

5.3 Le recueil des données et la construction de traces primaires

5.3.1 Le dispositif de recherche

Le dispositif de collecte des données est sensiblement le même dans les quatre classes observées (Canton de Genève primaire, Canton de Genève secondaire, France primaire, France secondaire).

Nous observons les quatre classes sur une durée suffisante pour que la thématique des états et des changements d'état soit abordée en profondeur (de 6 heures à 9 heures, ce qui correspond à 4 à 6 séances par classe). Les enseignants observés ont été choisis sur la base du volontariat : il se trouve qu'ils témoignent tous d'un investissement particulier vis-à-vis de l'enseignement des sciences.

Le dispositif est résumé sur la figure suivante :

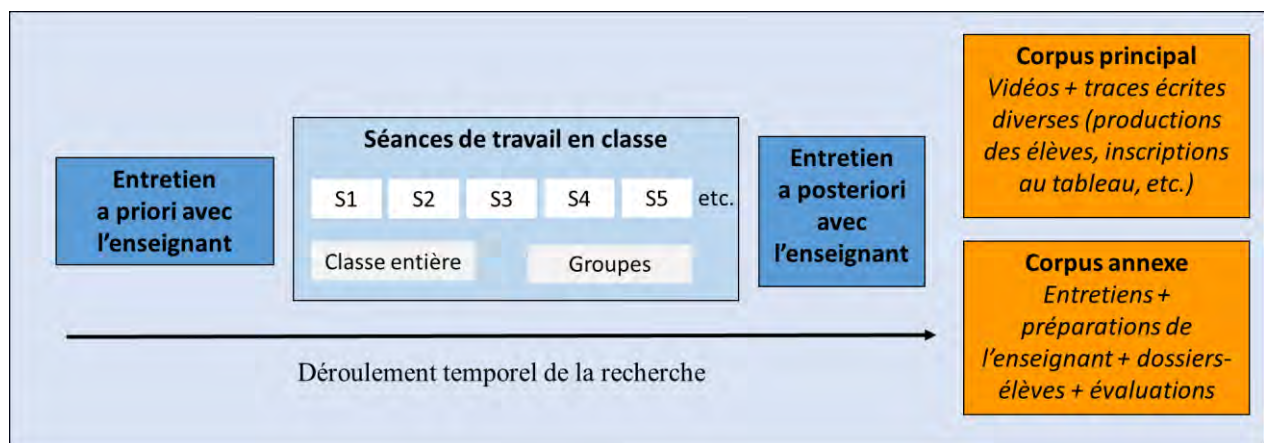


Figure 12 : Résumé du dispositif de recherche pour une classe

Nous développons chacun des éléments du dispositif dans les paragraphes suivants.

5.3.2 Construction des traces

5.3.2.1 Le corpus principal

Le corpus principal comprend des traces construites à partir des événements de la classe. Ce sont essentiellement les enregistrements vidéo des séances ainsi que l'ensemble des traces écrites produites en situation de classe.

Les vidéos des séances

Comme l'avance Sensevy (2013), capter les vidéos des séances de classe permet d'accéder de manière privilégiée à la dimension conjointe de l'action du professeur et des élèves :

« Asserter que l'action didactique est (...) une action conjointe entre professeur et élève dont le savoir est l'objet transactionnel, oblige à se donner les outils méthodologiques capables de rendre visible l'ajustement mutuel à autrui, l'ajustement mutuel à l'autre dans le savoir, pourrait-on dire en didactique. C'est dans cette perspective que le filmage des transactions prend son sens (...) Il donne à voir l'ajustement mutuel à l'autre inhérent à toute action conjointe, et l'ajustement mutuel à l'autre dans le savoir inhérent à l'action didactique conjointe » (Sensevy, 2013, p. 9)

En effet, les traces vidéos permettent d'enregistrer les voix, et donc de relever « les mises en relief de tel ou tel élément du discours » et de « caractériser des énoncés selon leurs modalités énonciatives (assertion, interrogation, injonction, exclamation...) » (Sensevy, 2013, p. 12). Elles permettent également de recueillir « la corporéité des transactions » à travers « les mouvements du corps, la constitution de territoires, la relation construite par le partage d'un territoire commun » (Sensevy, 2013, p. 12). De plus, les vidéos constituent une trace stable qui nous permet de rejouer, de reprendre et de manipuler les observations (en répétant plusieurs fois un passage, en retournant en arrière, en ralentissant ou accélérant la vidéo, par des effets de zoom avant ou arrière, etc.). L'ensemble de ces éléments illustre les raisons pour lesquelles les vidéos nous donnent un accès privilégié à l'aspect conjoint de la relation enseignant-élèves.

L'élément central des données réside dans les enregistrements vidéo des séances dans les quatre classes du primaire et du secondaire, en France et en Suisse romande (soit 29 heures d'enregistrement). Nous disposons de deux caméras dont résultent deux points de vue différents sur l'action :

- la première caméra, fixe sur un trépied au fond de la salle, balaie l'espace de la classe et elle est reliée à un microphone porté par l'enseignant ;
- la deuxième caméra, mobile est tenue par le chercheur. Elle se concentre sur un groupe donné, maintenu identique tout au long de la séquence. Elle est reliée à un microphone placé au milieu du groupe considéré. Elle donne à voir l'évolution des rapports aux objets établis par les membres du groupe en réponse aux milieux dans lesquels ils évoluent.

Ces deux dispositifs permettent de mettre en relation le point de vue du collectif (ultimement régi par l'enseignant) et le point de vue des élèves dans le groupe, à l'instar du prototype

méthodologique initialement proposé par Schubauer-Leoni & Leutenegger (2002) dans des dispositifs sur temps court (une ou deux séances).

Il importe cependant de souligner que le cadrage des caméras et le choix de placement des microphones jouent un rôle essentiel vis-à-vis des observables récoltées : ils font disparaître les faits non cadrés dans le champ de la caméra et/ou peu audibles. Les enregistrements vidéo procèdent donc d'une sélection des événements didactiques de la classe. Les choix méthodologiques les concernant créent donc un point de vue sur l'action.

Enfin, nous pensons que travailler à l'échelle d'une séquence permet à l'enseignant et aux élèves de s'accoutumer à la présence des éléments exogènes à la classe (caméras, micros, chercheur) et de limiter les effets de modification du comportement des protagonistes de la classe.

Les traces écrites

Aux traces précédentes, nous adjoignons les traces écrites des élèves (ce qu'ils notent sur les fiches distribuées, leurs dessins, leurs schémas, etc.). Nous considérons que ces traces constituent un complément aux enregistrements vidéo : le passage à l'écrit ouvre d'autres possibilités à l'expression des élèves, en permettant l'utilisation d'autres systèmes sémiotiques. Les traces écrites des élèves nécessitent donc d'être croisées avec les enregistrements vidéo afin d'approcher au plus près l'évolution des rapports aux objets établis par les élèves.

À ces traces, on ajoute l'ensemble des écrits produits en situation de classe : les écrits au tableau noir ou au tableau blanc, les affiches, etc.

5.3.2.2 Le corpus annexe

Le corpus annexe comporte des éléments associés à ce qui se joue en classe.

Les dossiers-élèves et les préparations de l'enseignant

Nous recueillons tout élément qui situe la séquence observée dans un contexte plus général : les dossiers-élèves, les évaluations qui suivent la séquence, les préparations des professeurs qui permettent de circonscrire ce qui a été fait précédemment à propos des propriétés de la matière, mais aussi les référentiels, les curriculums, programmes et plans d'études. Ces traces sont cruciales pour faciliter l'analyse a priori des situations dans lesquelles sont plongés les élèves : ce que l'élève peut faire dans une situation donnée dépend des ressources dont il dispose, ressources visibles à travers les institutionnalisations précédentes, les activités précédentes, etc.

Les entretiens avec l'enseignant

Les entretiens avec les enseignants sont une source d'information secondaire pour compléter les données d'observation directe et les données documentaires : l'enseignant est invité à parler de ce qu'il a fait ou de ce qu'il va faire. Le questionnement est donc de nature descriptive plutôt qu'explicative, même si, dans le discours de l'enseignant, apparaît inévitablement un mélange entre description et explication. L'entretien constitue une reconstruction des événements de la classe du point de vue de l'enseignant, mais en aucun cas une source d'explication directe des événements, du point de vue du chercheur.

Tous les entretiens sont individuels et semi-dirigés : nous adaptons le questionnement en fonction des réponses faites par les enseignants. Les questions des entretiens sont bâties en amont, à partir de certaines catégories en rapport avec nos axes de recherche : elles constituent le canevas de l'entretien. Tous les entretiens sont enregistrés et transcrits (cf. 5.4.1). Nous effectuons deux entretiens par enseignant, l'un se situant avant les enregistrements vidéo des séances de classe (entretien ante observation) et l'autre après (entretien post observation).

L'entretien ante observation

L'entretien ante observation a pour fonction de :

« recueillir le récit de l'enseignant qui anticipe pour le chercheur, un projet spécifique d'enseignement. Régi par un canevas, cet entretien cherche à éviter les généralités pour centrer le discours de l'enseignant sur les contenus d'enseignement tels que prévus pour le travail en classe » (Schubauer-Leoni, 2002, p.2).

C'est la compréhension de la nature du projet didactique de l'enseignant, d'une part et la préparation des observations, d'autre part qui est au cœur de cet entretien. Nous donnons la trame générale du canevas d'entretien, en donnant les thématiques successives sur lesquelles porte le questionnement :

- La biographie professionnelle de l'enseignant : sa formation, ses différents postes, sa connaissance des degrés de la scolarité (au primaire).
- Le contexte de l'école et de la classe : milieu socio-culturel, hétérogénéité, nombre d'élèves, ambiance générale.
- Les ressources que l'enseignant utilise : place des injonctions officielles (PER, programmes), des moyens d'enseignements, des manuels scolaires, des fiches trouvées sur Internet.
- Les tâches prévues à propos de l'enseignement des états et des changements d'état : objectifs d'apprentissage, rôle des élèves et de l'enseignant, difficultés anticipées des élèves et moyens de remédiation prévus, matériel utilisé, place de l'expérience, articulation des tâches les unes par rapport aux autres, répétition (ou pas) d'une séquence déjà enseignée.
- L'impact des recommandations officielles des démarches de reconstruction de savoirs (en déclinant les questions selon les contextes) : compréhension personnelle et mise en œuvre de la démarche d'investigation, de la démarche scientifique, de la modélisation.
- Les buts globaux attribués à l'enseignement des sciences à l'école primaire / au secondaire inférieur

Dans la pratique ordinaire, l'enseignant doit rarement rendre compte de la manière dont il pense organiser sa leçon à l'avance. Le mettre dans cette situation modifie probablement le projet d'enseignement lui-même : décrire l'activité, c'est déjà la transformer. Le contrôle des questions, à travers le canevas d'entretien, permet de faire le moins possible intrusion dans ce projet, tout en permettant à l'enseignant de s'expliquer à son propos.

L'entretien post observation

L'entretien post observation a pour fonction de recueillir le point de vue de l'enseignant sur le déroulement de l'ensemble des séances observées (redoublement de l'expérience) : « il s'agit de se donner les moyens empiriques de revisiter la séance à travers la reconstruction discursive de l'acteur ayant tenu un des rôles majeurs dans la séance » (Schubauer-Leoni, 2002, p. 2). Le canevas d'entretien fait apparaître les questions suivantes :

- À propos de la reconstitution des événements : quelle était l'organisation des tâches observées ? Comment les élèves ont-ils traité ces tâches ? Quels ont été les principaux obstacles que vous avez repérés ? Les productions ou réponses d'élèves correspondent-ils à ce que vous attendiez ?
- À propos de l'interprétation de certains événements : Comment interprétez-vous telle conduite, telle procédure ? Qu'est ce qui l'a entraîné, selon vous ? Lorsque vous êtes intervenu, comment voyez-vous cette interprétation a posteriori ?
- À propos des suites possibles : Quel bilan est-il possible de tirer de la séquence ? Allez-vous reprendre les savoirs étudiés dans d'autres séquences cette année ? Reprendrez-vous la même séquence l'année prochaine ? Avec quelles modifications ?

5.4 Le traitement des données et la construction de traces secondaires

L'analyse sur les enregistrements vidéo présente plusieurs limitations : d'abord, la perception est dépassée par la quantité de données à traiter ; ensuite, l'observateur subit la chronologie et la concomitance des faits imposées par le déroulement de la vidéo ; enfin, la vidéo produit un flux indifférencié de l'activité des acteurs (pas de catégorisation, de mise en lien, d'emboîtements, etc.). Ces caractéristiques des enregistrements vidéo nous ont encouragés à proposer deux autres types de traces :

- un protocole d'interactions par la transcription des discours et de certaines actions ;
- un synopsis du déroulement de l'action par découpage d'unité et dénomination de ces unités dans un tableau.

5.4.1 La transcription et ses modalités

La transcription rend compte du continuum du discours et de certaines actions dans l'espace sensible, à travers la production d'un texte écrit (pour un exemple, cf. Tableau 1).

<p>165.Mat : regardez l'eau/ ça s'est une petit peu flouté/ (Max et Mat se regardent de part et d'autre du ballon)/ hein Titou je te vois à l'envers hein</p> <p>166.Max : elle devient trouble un peu</p> <p>167.Ana : (regarde le thermomètre) je suis à 20[s]/ je suis à 23[s]</p> <p>168.Mat : y a des mini-bulles</p> <p>169.Ana : je suis à 25[s] là</p>

Tableau 1 : Exemple de transcription

La production de ce texte s'organise en tenant compte de la spécificité du langage oral par rapport au langage écrit : d'un côté, le ton, les pauses dans le débit de la parole, les interjections, l'adressage, etc. font partie de l'encodage du texte ; de l'autre, les marques classiques de ponctuation en sont absentes. Le transcripteur se place au plus près du langage oral, en évitant d'attribuer des intentions aux participants.

Les caractéristiques principales de la transcription sont les suivantes :

- Sa structure se fonde sur les tours de parole et/ou d'action : un retour à la ligne est effectué à chaque fois qu'un participant prend la parole (ou interagit par une action).
- La transcription du discours et/ou des gestes de chaque tour de parole est précédée du prénom en abrégé du participant qui les produit. Les prénoms de tous les participants ont été rendus anonymes.
- Les intonations montantes sont codées par une flèche montante (↑) ; Les intonations descendantes sont codées par une flèche descendante (↓).
- Les temps de pause dans le discours sont codés par un ou plusieurs slash(s) ; un slash (/) représente une pause qui dure le temps d'une respiration ; deux slashes (//) représente une pause d'1 à 3 secondes ; trois slashes (///) représentent une pause d'une durée supérieure à 3 secondes.
- Les gestes significatifs des participants sont notifiés entre parenthèses. Les autres détails que le transcripteur juge importants (par exemple, ceux relatifs aux caractéristiques du montage expérimental) sont indiqués entre crochets.

5.4.2 Le synopsis et ses modalités

Dans les travaux en didactique, il existe différentes formes de synopsis, qui répondent à des questions de recherches différentes (pour un exemple en didactique du français, cf. Schneuwly, Dolz & Ronveaux, 2006).

Dans la lignée de Ligozat (2008), nous considérons que le synopsis consiste à découper le cours de l'action saisi par les enregistrements vidéo en une série d'épisodes reliés à des durées temporelles et à subsumer ces épisodes sous des dénominations communes. Le synopsis se présente typiquement sous forme de tableaux, ce qui permet de créer des emboitements, c'est-à-dire une hiérarchie d'épisodes et de sous-unités d'épisodes.

Pour notre part, nous avons choisi de créer deux types de synopsis : le premier résume l'action filmée en donnant une vue d'ensemble de l'unité d'enseignement entière (le synopsis « macroscopique ») ; le second fournit un résumé de l'action au niveau d'un unique enjeu d'apprentissage choisi (le synopsis « mésoscopique »). Un exemple de ce dernier type de synopsis est donné dans le Tableau 2 (p. 126).

Sensevy (2013) a conceptualisé les fonctions du synopsis. Au-delà de rendre possible l'appréhension d'une quantité importante de données, selon Sensevy (2013) :

« Le principe synoptique repose sur deux grands types de rapprochement, de mise en contiguïté. Un rapprochement interne, qui défait l'irréversibilité du temps, qui permet d'observer la genèse d'une pratique et de comparer entre eux différents moments de cette genèse. Un rapprochement externe (« horizontal », entre les deux colonnes, correspondant à la comparaison des deux classes, dans le tableau précédent), qui défait la différenciation spatiale (et temporelle), qui permet d'observer simultanément deux pratiques et de les comparer entre elles » (p. 24)

Autrement dit, le synopsis rapproche et met en connexion des faits, séparés spatialement ou temporellement (comparaison de deux moments d'une même séquence ou de deux moments provenant de deux pratiques différentes), que la perception ne pouvait pas réunir jusque-là, car ils étaient « noyés » dans le flux indifférencié de l'action. Ce mouvement de rapprochement de certains moments permet de porter un nouveau regard sur les données et d'en dégager des phases et des événements significatifs, en réponse à certains questionnements particuliers :

« le synopsis invite à l'exploration plus fine de certaines unités de ce découpage. Il peut inciter par exemple à se demander ce qui a déterminé le passage d'une scène à une autre, ou ce qui explique la présence de telle ou telle récurrence, ou à conjecturer, pour une scène particulière, la présence d'événements potentiellement pertinents, dont l'étude permettra l'élucidation de l'action » (Sensevy, 2013, p. 26)

Le synopsis, en faisant « discuter » des moments disjoints jusque-là, provoque un renouvellement de notre perception de certains événements, qui deviennent alors candidats pour une analyse approfondie au niveau microscopique : il prépare donc le terrain pour la transition entre une analyse des niveaux mésoscopique et microscopique.

Bien que le synopsis soit produit dans « une certaine forme de suspension (provisoire) du jugement et de neutralité interprétative » (Sensevy, 2013, p.22), il reste le fruit de choix particuliers de découpages. Il importe donc de clarifier les implicites de la structuration de l'action à l'œuvre derrière la production du synopsis.

Premier type de structuration de l'action : les enjeux d'apprentissage (niveau macroscopique)

Le premier type de structuration correspond aux enjeux d'apprentissage visés par l'enseignant : il s'agit des objectifs qu'il se fixe, visibles à travers la succession et l'articulation des tâches de la séquence. La transition entre deux enjeux successifs est indiquée par des ré-orientations de l'action, impulsées par l'enseignant, qui correspondent à des modifications importantes du milieu et/ou du contrat. Celles-ci sont inférables dans le protocole à partir des « marqueurs » linguistiques spécifiques qui accompagnent ces changements (« voilà », « alors, maintenant... », etc.) et des tours de parole qui comportent une nouvelle consigne ou une modification importante de la consigne précédente.

Plusieurs niveaux caractérisent les enjeux d'apprentissage : il existe des enjeux et des sous-enjeux. Par exemple, l'enjeu global à l'échelle d'une séquence (enjeu de niveau N+1) est : « Etude des propriétés des états de l'eau, des changements d'état de l'eau et des mélanges

aqueux » ; Le premier sous-enjeu de cet enjeu global (enjeu de niveau N) est : « Introduction de la catégorisation des états de la matière (solide, liquide, gaz) » (cf. enjeu N1 du Tableau 2, p. 126) ; le premier sous-enjeu de cet enjeu de niveau N (enjeu de niveau N-1) est : « Identification du thème d'étude : les formes que peut prendre l'eau » (cf. enjeu N11 du Tableau 2, p. 126) ; etc.

Le synopsis « macroscopique » se limite au passage en revue des emboîtements des enjeux d'apprentissage tandis que le synopsis « mésoscopique » présente d'autres formes de structurations de l'action que nous présentons ci-après.

Second type de structuration de l'action : les phases d'action (niveau mésoscopique)

Au sein du niveau N-1, dernier niveau hiérarchique des enjeux, nous recensons les phases d'action, c'est-à-dire les étapes mises en place afin d'atteindre l'enjeu. Par exemple, l'enjeu « identification du thème d'étude : les formes que peut prendre l'eau » (cf. enjeu N11 du Tableau 2, p. 126) est découpé en plusieurs phases d'action :

- Dans la première phase qui se déroule en collectif (N11a), Amélie demande aux élèves de dessiner ou écrire toutes les choses auxquelles ils pensent à propos de l'eau.
- Dans la seconde phase (N11b), les élèves représentent ou écrivent ce que l'eau évoque pour eux.
- Dans la troisième phase (N11c), une synthèse collective a lieu et mène au recueil d'une diversité de mots ayant trait à l'eau : couleur bleue ; piscine ; à boire ; la mer ; la vie ; le bateau ; une bouteille ; jacuzzi ; tsunami, etc. À l'issue de cette phase, l'enseignante déclare que le nouveau thème d'étude de cette unité d'enseignement, ce sont les formes que peut prendre l'eau.

La transition entre deux phases d'action successives est indiquée par des petites ré-orientations de l'action, qui correspondent à des petites modifications du milieu et/ou du contrat. Elles sont typiquement indiquées par certains marqueurs linguistiques spécifiques (« je vous laisse réfléchir en groupe », « qu'avez-vous trouvé ? ») ou des changements d'organisation sociale. Ces transitions sont le plus souvent impulsées par l'enseignant mais il arrive parfois que les élèves parviennent à imposer eux-mêmes des transitions, en obligeant l'enseignant à faire des retours en arrière ou à prendre en compte une nouvelle perspective dans la thématique abordée.

Chaque phase d'action laisse également apparaître des micro-événements liés aux objets du milieu qui permettent d'avoir accès aux principaux objets de savoir qui se construisent dans la phase. Ainsi, les apports principaux dans la mésogenèse sont recensés (en italique) et les résultats d'institutionnalisation apparaissent (en gras italique) (cf. Tableau 2, p. 126). Ajouter du contenu à la structure synoptique contribue à clarifier la nature des situations, autour desquelles interagissent enseignant et élèves.

Enjeux de niveau N	Enjeux de niveau N-1	Phases d'action <i>Apports principaux dans la mésogenèse en termes de contenus</i> Résultats d'institutionnalisation en gras Organisation sociale- Empan temporel
Introduction de la catégorisation des états de la matière (solide, liquide, gaz)	Identification du thème d'étude : les formes que peut prendre l'eau	Introduction du nouveau thème & Consigne <i>Le nouveau thème d'étude est l'eau.</i> <i>Consigne : dessiner ou écrire toutes les choses auxquelles vous pensez à propos de l'eau</i> On rencontre l'eau à plein d'endroits différents. Collectif - S1(20' – 23') N11a
		Représentation ou rédaction des idées à propos de l'eau Individuel - S1(23' – 27') N11b
	N11	Mise en commun des idées à propos de l'eau & identification du thème d'étude <i>Idées à propos de l'eau : Couleur bleue/La piscine/À boire/Transparent/Liquide/La mer/ La vie/ La neige/ La glace/Une bouteille/ Beau/Tsunami/ Jacuzzi/ Etc.</i> Le nouveau thème d'étude est les formes que peut prendre l'eau. Collectif - S1(27' – 30') N11c
	N1	Description et dénomination de l'eau dans la nature à travers 20 photographies
N12		Identification de l'endroit où se trouve l'eau et du nom du phénomène sur les 20 photographies 1 Rosée/2 verglas/3 Iceberg/4 Glaçons/5 Vapeur d'eau/6 Givres sur les voitures/7 Brouillard/ 8 Nuages/9 Pluie/ 10 Mer/11 lac/12 Rivière/13 Glacier/14 Banquise/15 Gelée/16 Buée/17 Brume/18 Cristal de glace/19 Neige/20 Grêlons Collectif - S1(31' – 40') N12b

Tableau 2 : Exemple de synopsis « mésoscopique » (relatif à l'enjeu d'apprentissage N1)

Conclusion

Au final, transcription et synopsis répondent à des finalités semblables au sein de notre méthodologie de recherche :

- Ils résument l'action filmée : en opérant une réduction des données, ils rendent possible l'appréhension d'un ensemble important de données, sans perdre de vue leur structure temporelle.
- Ils reconfigurent l'information : en opérant un rapprochement, une mise en contiguïté de faits disjoints, ils permettent la comparaison de deux moments d'une même séance ou de deux moments de deux pratiques différentes.

La création de ces deux types de traces prépare la discussion entre les différentes échelles d'analyse des pratiques de classe (macroscopique, mésoscopique, microscopique) et anticipe l'identification des extraits significatifs au sein des phases d'action choisies.

5.4.3 La structure de l'analyse

5.4.3.1 Choix des phases et identification des extraits significatifs

L'analyse se poursuit en choisissant, au sein du synopsis de niveau mésoscopique, certaines phases d'action qui seront étudiées de manière approfondie, notamment en extrayant de celles-ci quelques extraits significatifs au regard des questions de recherche qui seront analysés au niveau microscopique.

Le choix des phases d'action et des extraits pertinents bénéficient des modalités de construction des synopsis. Nous avons déjà souligné que le synopsis, en mettant en connexion des faits séparés spatialement ou temporellement, provoque un renouvellement de notre perception de certains d'entre eux, qui deviennent alors candidats pour une analyse approfondie au niveau microscopique. Les raisons qui président à ces choix sont dès lors à la fois internes et externes à un corpus donné :

- Les synopsis permettent de comparer les thématiques et les systèmes de tâches dans l'ensemble des corpus des quatre classes observées. Il s'agit dès lors de choisir des phases d'action avec un potentiel de comparabilité satisfaisant, aussi bien en termes de transition entre le primaire et le secondaire que de rapprochement « horizontal » entre les deux classes du primaire et les deux classes du secondaire. Ainsi, au primaire, nous avons choisi de retracer comment la notion de vapeur d'eau se construit dans la classe, en lien avec les changements d'état qu'elle subit, puisque ce cheminement est effectué en parallèle dans la classe française et la classe suisse-romande. Au secondaire, nous avons continué à nous intéresser aux changements d'état faisant intervenir l'état gazeux (l'évaporation dans la classe suisse-romande ; l'ébullition dans la classe française). Ces choix représentent des opportunités favorables pour s'interroger sur la manière dont l'école reconfigure un même phénomène, selon qu'il est traité par un enseignant généraliste ou un enseignant spécialiste, au niveau primaire ou secondaire.
- À l'intérieur d'un même corpus, d'autres raisons, liées à la spécificité des savoirs en jeu, éclairent notre volonté de nous appesantir sur certains extraits particuliers. Nous avons déjà souligné que l'activité de modélisation était au cœur de l'enseignement des sciences (cf. 2.1.2). Nous privilégions donc des extraits qui mettent en lumière la succession des événements cruciaux qui sont à l'origine de l'établissement et/ou de la mobilisation d'un modèle pour interpréter et/ou prévoir certains événements du monde naturel. Ces extraits doivent être contenus au sein d'un ou plusieurs enjeu(x) d'apprentissage révélé(s) par l'outil synoptique. Par exemple, si un enjeu d'apprentissage est le modèle du « palier de température » lors de l'ébullition et que l'enseignant a organisé plusieurs phases d'action pour atteindre cet enjeu (émission d'hypothèses, réalisation de l'expérience d'ébullition, rédaction d'un compte-rendu, mise en commun des résultats, etc.), nous allons collecter,

pour les analyser au niveau microscopique, les extraits dans lesquels une identification de certains observables ou une mise en relation entre ceux-ci et un modèle donné est effectuée. Pour orienter notre regard vers le processus de construction et/ou de mobilisation des modèles, une analyse a priori des situations organisées par l'enseignant est donc indispensable. L'ensemble des extraits collectés doit être suffisant pour donner une idée précise de l'emboîtement des événements cruciaux qui aboutissent à l'institutionnalisation d'un modèle, un événement antécédent étant vu comme source possible d'un événement postérieur. Pour ce faire, nous favorisons, d'une part, les extraits associés aux interactions entre élèves des groupes filmés et d'autre part, les extraits dans lesquels les interactions entre enseignant et élèves sont nombreuses et donnent à voir l'évolution des rapports aux objets établis par les participants, ce qui explique la forte représentation des phases d'action de discussion collective dans nos analyses.

5.4.3.2 Analyse des événements significatifs : articulation du triplet de genèses avec l'analyse a priori du dispositif d'enseignement pour accéder à la logique interne de l'action des participants

La succession des extraits significatifs est ensuite analysée, au niveau microscopique, à l'aide d'une articulation entre l'analyse en termes de triplet de genèses et l'analyse a priori de la situation, de sorte à accéder à la logique de l'action des participants en contexte.

En effet, en définissant l'action en classe comme un ensemble complexe de gestes et de discours qui constitue un flux indifférencié d'événements, nous considérons que la logique de ces gestes et discours dépend de la manière dont les acteurs interprètent la situation et des buts qu'ils se donnent pour amorcer et mener une action. Il peut exister en classe des logiques concomitantes portées par différents acteurs (lors des travaux de groupes, par exemple) et des logiques interrompues (lorsque l'action est réorientée vers un nouvel objectif sous l'influence de l'introduction d'un nouvel élément dans le milieu, par exemple).

Nous avons déjà mis en avant (cf. 1.3) que :

- D'une part, l'analyse a priori vise à appréhender les possibles et les nécessaires engendrés par une situation didactique, en s'interrogeant notamment sur les implicites de la situation qu'un élève doit parvenir à décoder, sur les ressources sur lesquelles il peut s'appuyer, sur les obstacles à prévoir en fonction de ces paramètres, sur les régulations que l'enseignant doit anticiper.
- D'autre part, l'analyse en termes de triplet de genèses prend en compte le caractère conjoint de l'action de l'enseignant et de élèves, selon trois angles : l'évolution des objets et des rapports aux objets que ceux-ci construisent au cours du temps ; le partage des responsabilités dans cette construction ; la progression du savoir.

L'articulation de ces deux analyses permet de donner une interprétation des actions des participants et donc de reconstruire la logique d'action des élèves et de l'enseignant, d'abord au niveau (microscopique) d'un seul extrait significatif. Pour un exemple de l'analyse d'un extrait significatif, cf. Tableau 3, p. 131.

Description de la situation : En collectif, Louise demande aux élèves de catégoriser le brouillard sous un des trois états de l'eau : gaz, liquide, solide.

Analyse a priori (extraits) :

Les ressources disponibles pour traiter de cette question sont susceptibles de provenir de deux origines distinctes. En effet, les objets « brouillard », « liquide » et « gaz » possèdent une existence dans les pratiques langagières de la vie quotidienne, d'une part et dans celles de la classe de Louise, d'autre part :

- Dans la vie quotidienne, le rapport à l'objet « brouillard » tend à le placer sous l'état gazeux. En effet, le brouillard apparaît blanc, alors que l'eau liquide « habituelle » est incolore ; on ne peut pas le mettre dans un récipient, comme les liquides usuels ; etc. D'un autre côté, il occupe un grand volume non délimité dans l'espace, un peu à la manière des gaz. Dans cette institution, les propriétés du brouillard paraissent se rapprocher davantage d'une vision naïve de l'objet « gaz » que d'une vision naïve de l'objet « liquide ».
- Dans la classe de Louise, les précédentes institutionnalisations ont associé systématiquement la présence de gouttelettes à l'état liquide de l'eau, notamment à travers l'exploration d'un document de référence. D'autre part, lors d'une discussion précédente sur la nature de la buée, l'enseignante a fait remarquer que lorsqu'on passe ses doigts sur la buée (en mimant le geste), ils ressortent mouillés, ce qui a aussi permis de la classer sous l'état liquide. En résumé, une modélisation primitive de l'état liquide a été instaurée et des critères pour reconnaître cet état ont été institutionnalisés : présence de gouttes, fait d'être mouillé à son contact. La buée a aussi été catégorisée comme liquide. Tous ces éléments sont susceptibles de fournir des points d'appui au raisonnement des élèves.

Extrait L4 : Le brouillard est-il un liquide ou un gaz ?

1. *Ens : et alors moi je vous en dis un/ vous me dites si vous pensez que c'est liquide solide ou gazeux/ le brouillard* ↑
2. *Els: c'est gazeux [intermède disciplinaire]*
3. *Ens: le brouillard alors qu'est-ce que vous en pensez /Marwah* ↑
4. *Mar: gazeux (sonnerie)*
5. *Ens: gazeux/ est-ce que vous êtes d'accord avec Marwah* ↑ / *t'es d'accord (à Sof)* ↑
6. *Sof: oui (opine)*
7. *You : ça fait de la fumée/ ça fait du gaz*
8. *Sof: c'est parce qu'en fait le brouillard/ quand tu vois du brouillard tu fais ça mais c'est pas comme l'eau liquide (passe la main devant lui) tu fais ça peut pas l'attraper/ c'est comme/ c'est/ transparent/ tu*
9. *Far: oui mais maîtresse le gaz/ le brouillard quand t'es dans le brouillard/eh ben fait tu sors tu sors du brouillard t'as de la buée et dans la buée y a des gouttelettes donc c'est des gouttelettes*
10. *Ens: donc/ qu'est-ce que vous en pensez/ Farel il dit/ c'est de la buée/ le brouillard/ c'est des gouttelettes parce que/ quand on va dans la brouillard ça fait comme des gouttelettes et y en a d'autres qui pensent que c'est du gaz donc ce qu'on va faire c'est qu'on va pas le marquer le*

brouillard/ on relira notre documentaire sur l'évaporation et la condensation et on essayera de voir si on le met ici ou ici [sous gaz ou liquide] le brouillard d'accord ↑

Analyse [méso/topo/chronogénèse] :

L'enseignante oriente la discussion sur un phénomène en particulier (« le brouillard », TdP 1). Plusieurs rapports à l'objet « brouillard » émergent alors :

- Certains élèves identifient le brouillard à de l'eau sous l'état gazeux (TdP 2), dont Marwah, Younès et Sofiane (TdP 4-8) ; pour défendre ce point de vue, Younès assimile le brouillard à de « la fumée » et à « du gaz » (TdP 7) ; quant à Sofiane, il déclare que le brouillard ne ressemble pas à de l'eau liquide, puisqu'on ne peut pas se saisir d'une poignée de brouillard comme on le ferait avec de l'eau liquide (TdP 8).
- Farel, au contraire, soutient que puisqu'on ressort du brouillard couvert de buée et que la buée est composée de gouttelettes, alors le brouillard est aussi fait de gouttelettes (TdP 9) [*mésogénèse*].

L'enseignante prend une position basse d'accompagnement en encourageant les élèves à développer leurs idées sur le statut du brouillard (TdP 3, 5). Les élèves trouvent là une occasion privilégiée de partager leurs idées au niveau du collectif et de débattre entre eux (Younès, Sofiane et Farel se répondent sans intervention de l'enseignante durant 3 tours de parole). À la fin, l'enseignante diffuse le raisonnement de Farel et organise la contradiction entre son opinion et celle des premiers élèves qui pensent que le brouillard est du gaz (TdP 10). Enfin, elle fournit une règle d'action qui permet de trancher entre les deux groupes : la relecture d'un document scientifique de référence (TdP 10) [*topogénèse*].

À la fin de l'extrait, le statut du brouillard n'est pas complètement élucidé [*chronogénèse*].

Interprétation en termes de logique d'action de l'enseignant et des élèves :

La logique d'action des élèves s'éclaire, au regard de l'analyse a priori :

- Younès qui assimile le brouillard à de la fumée et du gaz et Sofiane, qui met au jour des caractéristiques du brouillard qui diffèrent du comportement d'un liquide usuel se fient aux rapports aux objets « brouillard », « liquide » et « gaz » issus de la vie quotidienne.
- Farel, de son côté, mobilise les signes révélateurs de l'état liquide déjà mis en évidence dans la classe de Louise : l'existence de gouttelettes et le fait d'être mouillé au contact d'un liquide. Comme la buée vient d'être « basculée » du côté des liquides (car elle est faite de gouttelettes puisqu'elle mouille les doigts) et que lorsqu'on traverse le brouillard, on ressort couvert de buée, il est cohérent d'assimiler brouillard et buée. Le brouillard est alors aussi fait de gouttelettes : il est liquide. Farel parvient ainsi à articuler le faisceau d'indices de reconnaissance de l'état liquide déjà existants dans la référence commune et à en ajouter un (la présence de buée devient suffisante pour démontrer l'état liquide d'un objet).

Quant à l'enseignante, elle se met en position basse d'accompagnement car elle peut se reposer sur la référence commune qu'elle a co-construite (et notamment, sur la modélisation

primitive de l'état liquide déjà donnée). En effet, celle-ci vient contraindre efficacement l'évolution des rapports que certains élèves entretiennent avec les objets de la situation ; elle donne un cadre productif au développement de nouveaux rapports aux objets « brouillard », « liquide » et « gaz » pour certains élèves (notamment, Farès). À la fin de l'extrait, il lui suffit d'organiser la contradiction entre les rapports à ces objets qui restent sur une vision naïve de l'état liquide et ceux qui reflètent une appropriation de la modélisation primitive de l'état liquide déjà-là. Le recours au document de référence montrera, à coup sûr, lesquels de ces rapports aux objets « brouillard », « liquide » et « gaz » l'institution scolaire privilégie. La nature de la référence commune éclaire donc la position d'accompagnement et les variations topogénétiques que l'enseignante adopte tout au long de l'extrait.

Tableau 3 : Exemple de l'analyse d'un extrait significatif

L'analyse qui permet de remonter à la logique d'action des participants est renouvelée pour l'ensemble des événements significatifs d'une classe donnée.

L'objectif est de confronter les conclusions formées à partir d'un seul extrait à l'ensemble des extraits de la séquence d'une même classe (principe de triangulation des données). Lorsque la récurrence de la logique d'action de l'enseignant et/ou des élèves est attestée sur l'ensemble des extraits, nous pouvons inférer des schémas d'action à l'échelle de l'unité d'enseignement observée.

5.4.3.3 Investigation des questions de recherche à partir des schémas récurrents d'action

À partir de la connaissance de ces schémas d'action, nous sommes en mesure de remonter : i) aux degrés de continuité entre les rapports aux objets construits par les élèves et ceux visés par l'enseignant et ii) aux diverses stratégies que l'enseignant développe au cours de la négociation des rapports aux objets construits par les élèves pour atteindre ce degré de continuité.

Ces schémas d'action fournissent également un appui pour construire les formes d'épistémologie pratique qui caractérisent chacun des enseignants, c'est-à-dire l'exploration de la manière dont chacun d'entre eux intègre et reconfigurent les injonctions institutionnelles pour structurer ses pratiques de classe. Pour ce faire, nous procédons à une modélisation ascendante des principes qui organisent et structurent les schémas d'action des enseignants. Ces principes structurants sont décantés à partir d'une analyse comparatiste des schémas d'action émergents dans les quatre contextes étudiés : c'est l'analyse comparatiste qui permet de décontextualiser des schémas d'action locaux et embarqués dans une action conjointe particulière pour en inférer des principes structurants plus généraux. Nous nous efforçons ensuite de mettre en résonance, lorsque c'est possible, les principes structurants avec les caractéristiques des textes prescriptifs correspondants. Enfin, nous discutons les conséquences de ces principes sur les conditions d'accès aux savoir du point de vue des élèves. Dans ces processus, le corpus annexe (notamment, les entretiens ante et post avec les enseignants) joue le rôle de discutant pour nuancer et approfondir les premières interprétations mises au jour.

Enfin, le croisement comparatiste entre les résultats issus des différents contextes institutionnels étudiés (France Primaire, France Secondaire inférieur, Canton de Genève Primaire, Canton de

Genève Secondaire Inférieur) nous permet de dégager des phénomènes relatifs aux conditions générales de l'établissement d'une continuité entre rapports aux objets construits par les élèves et rapports aux objets visés par l'enseignant. Nous avons souligné dans le paragraphe 1.2 que l'identification des phénomènes génériques ne sont pas visibles par comparaison directe, mais doivent être construits à l'aide d'outils à fort potentiel de généralité. Dans notre cas, les conditions de l'établissement d'une continuité entre rapports aux objets construits par les élèves et rapports aux objets visés par l'enseignant conditions sont inférées à l'aide de certains outils théoriques issus de la didactique comparée qui jouent le rôle de tiers comparant : la dialectique entre contrat et milieu et la notion de référence partagée, notamment.

5.5 Conclusion

Notre méthodologie implique une logique de reconstruction ascendante depuis les pratiques spécifiques des acteurs vers les déterminants institutionnels de cette action à travers :

- la mise en tension d'un système de traces, constitué d'un corpus principal relatif à la séquence observée, d'un corpus annexe relatif aux éléments associés à la classe mais aussi des transcriptions et synopsis élaborés à partir des enregistrements vidéo.
- la comparaison des systèmes de traces provenant des quatre contextes étudiés : l'école primaire en France, l'école secondaire en France, l'école primaire à Genève en Suisse romande, l'école secondaire à Genève en Suisse romande.

Nous résumons les données collectées et les strates d'analyse sur la figure suivante (cf. Figure 13).

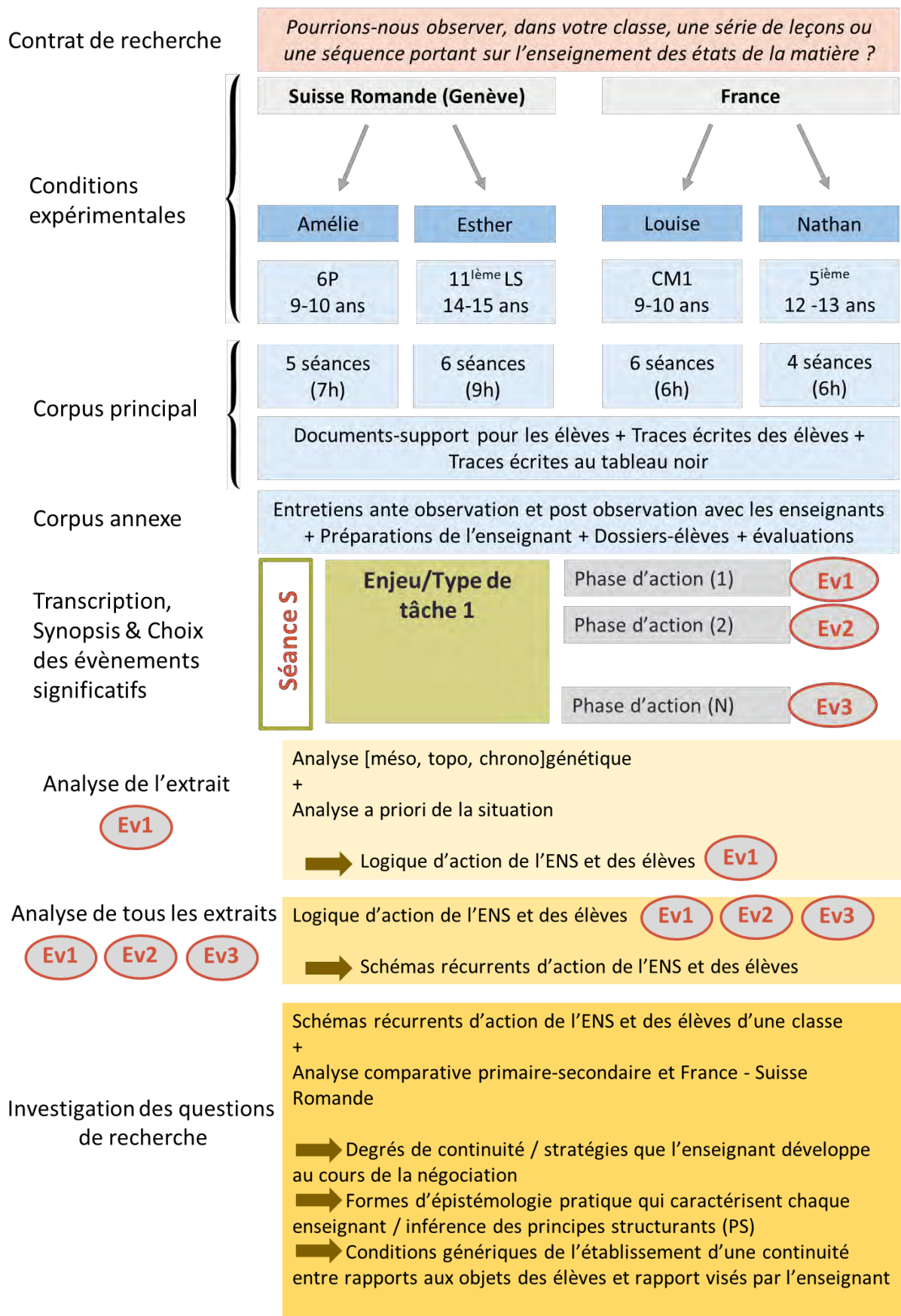


Figure 13 : Schéma des données collectées et des strates d'analyse

Chapitre 6 ANALYSE DES SAVOIRS EN JEU ET DES OBSTACLES ÉPISTÉMOLOGIQUES COMMUNS À TOUTES LES OBSERVATIONS

Notre analyse se concentre sur les savoirs relatifs à l'état gazeux et à l'état liquide de l'eau et aux changements d'état faisant intervenir ces deux états (évaporation, ébullition, condensation). Des enjeux en lien avec ces savoirs apparaissent dans l'ensemble des classes observées, en se déclinant selon le niveau considéré (primaire ou secondaire). Dans chacun des contextes, les élèves sont amenés à observer et interpréter l'évaporation et l'ébullition d'une certaine quantité d'eau et à formaliser les propriétés de l'état gazeux de l'eau. Au primaire, les élèves étudient également la condensation à travers la formation de la buée, du brouillard ou des nuages.

Nous effectuons ci-dessous le premier niveau d'analyse a priori, en développant une description et une interprétation de ces phénomènes par les modèles à caractère scientifique, d'une part, et une analyse des obstacles épistémologiques que ces phénomènes sont susceptibles de générer, d'autre part.

6.1 Les modèles scientifiques liés à la vapeur d'eau, l'eau liquide, l'évaporation, la condensation et l'ébullition

6.1.1 La vapeur d'eau

La vapeur d'eau constitue l'état gazeux de l'eau. C'est un gaz inodore et invisible. L'atmosphère contient jusqu'à 6-7 % de vapeur d'eau : celle-ci fait donc partie des gaz constituants de l'air.

La vapeur d'eau possède l'ensemble des propriétés macroscopiques et microscopiques de l'état gazeux. Au niveau macroscopique, elle n'a donc ni forme propre ni volume propre. Elle tend à occuper tout le volume disponible. Elle est compressible et expansible. Une quantité de vapeur d'eau est caractérisée par des grandeurs macroscopiques mesurables : sa quantité de matière, sa température, sa pression et son volume. Dans certaines conditions expérimentales définies (pression suffisamment faible), ces grandeurs sont liées mathématiquement entre elles à travers la loi des gaz parfaits.

Au niveau microscopique, les gaz (et par inclusion, la vapeur d'eau) sont modélisés par un ensemble de molécules très faiblement liées, éloignées les unes des autres et qui possèdent chacune une vitesse donnée. Dans le modèle du gaz parfait, les molécules de gaz n'interagissent pas du tout entre elles, à part lorsqu'elles subissent un choc avec d'autres molécules (du gaz ou des parois). Dans ce cas, le choc est considéré comme élastique. Entre deux collisions, la vitesse des molécules est rectiligne uniforme. Au sein de la théorie cinétique des gaz, la température est proportionnelle à l'énergie cinétique moyenne des molécules : elle reflète donc l'agitation des molécules du gaz. La pression exercée par un gaz sur une paroi résulte des collisions des molécules contre la paroi. Plus ces collisions sont violentes (c'est-à-dire plus la quantité de mouvement des molécules responsables des collisions est importante) et fréquentes, plus la pression qu'elles produisent est importante. À partir de ces éléments qui détaillent le

comportement des molécules, il est possible de retrouver la plupart des propriétés macroscopiques des gaz : par exemple, l'éloignement des molécules du gaz entre elles permet de rendre compte de sa capacité à être compressé. Plus complexe, le traitement mathématique de l'agitation des molécules et de leurs chocs contre les parois permet de retrouver la loi des gaz parfaits.

6.1.2 L'état liquide

L'eau à l'état liquide est omniprésente sur Terre : 70 % de la surface en est recouverte, principalement à travers les océans et les mers. Le brouillard, la buée, la brume, la rosée, les nuages, les volutes blanches au-dessus de l'eau chaude des casseroles ou des bouilloires sont aussi constitués de gouttelettes d'eau liquide. L'eau à l'état liquide est généralement incolore et constitue un très bon solvant. L'eau est une des rares substances dont l'état solide occupe plus de place que l'état liquide.

L'eau liquide possède l'ensemble des propriétés macroscopiques et microscopiques de l'état liquide. Au niveau macroscopique, l'eau liquide n'a pas de forme propre mais possède un volume propre. Elle est donc facilement déformable mais difficilement compressible. Elle prend la forme du récipient qui la contient. La surface libre au repos d'un liquide est plane et horizontale. Ces deux dernières propriétés ne s'appliquent pas aux gouttes sur les surfaces à cause de la tension superficielle. Une quantité d'eau liquide est également caractérisée par des grandeurs macroscopiques mesurables (quantité de matière, température, pression, volume).

Au niveau microscopique, les liquides (et, par inclusion l'eau liquide) sont modélisés par un ensemble de molécules faiblement liées (mais bien davantage que les molécules de l'état gazeux), rapprochées, pouvant se déplacer les unes par rapport aux autres et qui possèdent chacune une certaine agitation. Comme pour les gaz, il est possible de retrouver certaines propriétés macroscopiques des liquides à partir du comportement des molécules : par exemple, la proximité des molécules de liquide entre elles permet de rendre compte de son incompressibilité ; la présence de liaisons de faible intensité entre les molécules éclaire sa déformabilité ; etc.

Remarque

Du fait de sa prédominance dans la vie quotidienne, l'eau est le seul corps pur dont la dénomination renvoie uniquement à l'état liquide, et pour lequel l'état solide a un autre nom (glace) et l'état gazeux également (vapeur).

6.1.3 L'évaporation

Lorsqu'on laisse une petite quantité d'eau liquide ouverte sur l'atmosphère, il est possible de faire un certain nombre d'observations à l'échelle macroscopique et d'en donner plusieurs interprétations en termes de transformations physiques de la matière.

Du point de vue du comportement de l'eau, on remarque une disparition progressive de l'eau liquide. La vitesse de disparition dépend de nombreux facteurs : la surface d'eau exposée à l'air,

le taux d'humidité de l'air, la pression atmosphérique, la présence de vent, l'apport éventuel de chaleur, etc.

Il existe plusieurs niveaux d'interprétation de ce phénomène :

- D'abord, il est possible d'inférer que la disparition de l'eau liquide correspond au changement d'état de l'eau liquide vers l'eau sous forme gazeuse (vapeur d'eau). La vapeur d'eau étant invisible et inodore, le phénomène n'est perçu qu'à travers une seule de ses facettes (la disparition de l'eau liquide).
- Ensuite, en s'appuyant sur cette première modélisation, il en existe d'autres qui rendent compte de manière approfondie du phénomène d'évaporation. Elles permettent notamment de retrouver les facteurs d'accélération de l'évaporation mais aussi d'autres propriétés caractéristiques de l'évaporation (par exemple, le taux maximum de vapeur d'eau dans l'air atmosphérique pour une température et pression données).

- La modélisation en termes de pression se base sur la comparaison entre la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air et la pression de vapeur saturante de l'eau.

La pression atmosphérique de l'air est la somme des pressions de tous les gaz qui composent l'atmosphère. La vapeur d'eau exerce une partie de la pression atmosphérique totale : cette fraction de la pression due à la vapeur d'eau est appelée la pression partielle de la vapeur d'eau.

La pression de vapeur saturante est la pression à laquelle la phase gazeuse d'une substance est en équilibre avec sa phase solide ou liquide. Elle ne dépend que de la température.

D'après ce modèle, il y a évaporation si la pression partielle de vapeur d'eau est inférieure à la pression de vapeur saturante de l'eau (elle-même inférieure à la pression atmosphérique totale).

- La modélisation en termes moléculaires se fonde sur l'équilibre (ou la rupture d'équilibre) entre le taux de molécules qui quittent la phase liquide et le taux de celles qui la rejoignent.

Puisque les liaisons entre molécules n'existent qu'à courte distance (entre molécules voisines) et que les molécules de la surface n'ont pas de voisines au-dessus d'elles, les molécules de la surface d'un liquide sont moins liées que celles de l'intérieur. De plus, les vitesses des molécules possèdent une distribution en courbe de Gauss (en cloche) : certaines molécules ont des vitesses très élevées tandis que d'autres ont des vitesses plus faibles. En conséquence, il existe des molécules à la surface du liquide qui possèdent une vitesse suffisamment grande pour vaincre les (faibles) forces intermoléculaires de la surface : ces molécules s'échappent vers l'atmosphère et forment un gaz. Mais le jeu des collisions avec les autres molécules présentes dans l'air peut modifier la direction et le sens de leur vitesse de manière à ce qu'elles soient de nouveau réincorporées dans le liquide.

D'après ce modèle, il y a évaporation si le taux de molécules qui quittent le liquide pour passer en phase gazeuse est supérieur au taux de molécules qui quittent la phase gazeuse pour passer en phase liquide.

- La modélisation en termes énergétiques repose sur une analyse énergétique de la situation. L'évaporation nécessite une substantielle quantité d'énergie pour faire passer une quantité d'eau liquide en vapeur d'eau. En effet, une quantité de vapeur contient beaucoup plus d'énergie qu'une masse égale de liquide à la même température. On définit la chaleur massique latente de vaporisation (ou enthalpie massique de vaporisation) comme étant la quantité d'énergie nécessaire pour évaporer un kilogramme d'un liquide à température donnée. La chaleur massique latente de vaporisation est dépendante de la nature de la substance considérée et de la température.

D'après ce modèle, il y a évaporation d'une quantité donnée de liquide si la chaleur latente de vaporisation nécessaire est fournie au liquide. Le plus souvent, cette énergie provient de l'environnement immédiat : c'est pour cette raison que l'évaporation peut être considérée aussi comme un processus de refroidissement de l'environnement. Ainsi, si nous avons froid en sortant de la piscine, c'est que l'eau liquide restée sur notre corps s'évapore en nous prenant de l'énergie sous forme de chaleur.

Il est important de remarquer que ces trois modèles sont totalement cohérents entre eux. Sans prétendre à l'exhaustivité des connexions entre les modèles, voici un exemple qui l'illustre. L'emprunt de l'énergie thermique au milieu environnant prôné par le modèle en termes énergétiques pour l'évaporation peut être éclairé par le modèle en termes moléculaires : si on considère que les molécules qui s'échappent vers l'atmosphère sont les plus énergétiques (celles qui ont une vitesse plus élevée), elles devraient laisser derrière elles un liquide dont les molécules ont une valeur moyenne d'énergie cinétique plus faible (et donc une température plus basse). Mais par transfert thermique permanent, le milieu environnant fournit l'énergie nécessaire pour maintenir constante la température du liquide et donc alimenter à tout instant le liquide en molécules qui ont une énergie suffisante pour s'en libérer.

6.1.4 La condensation

Dans certaines circonstances, des phénomènes jugés similaires se produisent : du brouillard ou des nuages dans certaines conditions météorologiques, de la buée sur un support (vitre, miroir), des volutes blanches au-dessus des casseroles ou quand un animal expire, de la rosée qui apparaît à l'aube sur les plantes ou les toiles d'araignée, etc.

Il existe plusieurs niveaux d'interprétation de ces phénomènes :

- D'abord, le regroupement de ces phénomènes-là, à l'exclusion d'autres qui pourraient leur ressembler a priori (les volutes blanches de la fumée, par exemple) est la preuve d'un premier niveau d'interprétation. Ces phénomènes sont réunis car ils sont tous assimilés à de l'eau sous l'état liquide et ce, malgré le fait que leurs propriétés apparaissent à première

vue éloignées des propriétés générales des liquides. Nous reviendrons longuement sur ce point dans la section sur les obstacles épistémologiques (cf. 6.2 p.141).

- Ensuite, il est possible d'inférer que l'apparition de l'eau liquide correspond au changement d'état de la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère vers l'eau sous forme liquide. Comme pour l'évaporation, une seule facette du phénomène est perceptible (l'apparition de l'eau liquide). La condensation se produit lorsque la vapeur d'eau est refroidie au contact d'un corps froid.
- Ensuite, en s'appuyant sur ces premières modélisations, il en existe d'autres qui rendent compte de manière approfondie du phénomène de condensation. Elles permettent toutes d'expliquer les propriétés caractéristiques de la condensation (par exemple, ses conditions d'apparition). Comme elles sont strictement similaires à celles qui permettent d'expliquer l'évaporation, nous ne les développons pas avec autant de détails ci-dessous.
 - D'après la modélisation macroscopique en termes de pression, il y a condensation si la pression partielle de vapeur d'eau est supérieure à la pression de vapeur saturante de l'eau. Lorsque la vapeur entre au contact avec un corps à une température inférieure à la sienne, la pression de vapeur saturante qui ne dépend que de la température, s'abaisse, et la pression partielle de l'eau lui devient supérieure, ce qui explique qu'une différence de température soit requise pour que la condensation se produise.
 - D'après la modélisation en termes moléculaires, il y a condensation si le taux de particules qui quittent le liquide pour passer en phase gazeuse est inférieur au taux de particules qui quittent la phase gazeuse pour passer en phase liquide.
 - D'après le modèle en termes énergétiques, lorsqu'il y a condensation, une certaine quantité d'énergie thermique est rendue à l'environnement. C'est pour cette raison que la condensation peut être considérée aussi comme un processus de réchauffement de l'environnement (même si la température de l'atmosphère ne s'en trouve pas augmentée, par sa nature de réservoir thermique).

6.1.5 L'ébullition

Lorsqu'on chauffe de l'eau pure à la pression atmosphérique normale, il est possible de faire un certain nombre d'observations à l'échelle macroscopique et d'en donner plusieurs interprétations en termes de transformations physiques de la matière :

- Du point de vue de la température, on observe une augmentation régulière au cours du temps, jusqu'à atteindre un plateau autour de 100°C.
- Du point de vue du comportement de l'eau, des premières bulles apparaissent aux alentours de 30-40°C et correspondent à l'évacuation de l'air dissous dans l'eau. De la buée apparaît rapidement sur les parois du récipient. Viennent ensuite de grosses bulles de vapeur d'eau qui apparaissent au fond du récipient (c'est là que la température atteint en premier les 100°C à cause du contact avec la source de chaleur). Mais ces bulles se condensent rapidement au contact des couches supérieures d'eau plus froides sans pouvoir

remonter à la surface : on dit que l'eau frémit. À ce stade-là, un thermomètre plongé dans l'eau n'affiche pas encore 100°C et la température de l'eau continue d'augmenter. Lorsque tout le volume d'eau atteint 100°C de manière homogène, des remous/bouillons importants apparaissent : il s'agit de grosses bulles de vapeur d'eau prises dans un mouvement de convection qui réussissent à parvenir à la surface et, en éclatant, libèrent de l'eau sous forme gazeuse dans l'atmosphère. On dit que l'eau est en ébullition. À ce stade-là, la température de l'eau stagne à 100°C environ et ce, jusqu'à la fin du changement d'état.

Il existe plusieurs niveaux d'interprétation de ces phénomènes :

- D'abord, il est possible d'inférer que ces observations correspondent au changement d'état de l'eau liquide vers la vapeur d'eau invisible qui s'échappe vers l'atmosphère. Une partie mineure de ce changement d'état s'effectue par évaporation, dès le début du chauffage, comme en témoigne la buée sur les parois du récipient. Nous n'y revenons pas. L'autre partie s'effectue par ébullition, à partir du moment où la température de l'eau stagne aux alentours de 100°C. Ce premier niveau de modélisation, qui lie ébullition de l'eau et stagnation de la température sera appelé « modèle du palier de température » dans la suite.
- Plusieurs autres modélisations permettent de montrer que la connexion entre le changement d'état et la stabilisation de la température ne relève pas d'une corrélation contingente mais d'une véritable relation de cause à effet :
 - La modélisation macroscopique en termes de pression se fonde sur l'évolution de la pression de vapeur saturante de l'eau par rapport à la température. Lorsque la température de l'eau augmente, la pression de vapeur saturante (la pression à laquelle la vapeur d'eau est en équilibre avec sa phase solide ou liquide) augmente. D'après ce modèle, il y a ébullition lorsque la température de l'eau atteint le point où la pression de vapeur saturante est égale à la pression hydrostatique du liquide (approximativement égale à la pression atmosphérique pour un système ouvert sur l'atmosphère). Par définition, à cette température, la vapeur d'eau est en équilibre avec sa phase liquide : les bulles de vapeur formées sont stables et peuvent exister durablement au sein de liquide. C'est la raison pour laquelle l'ébullition est un phénomène qui se produit dans tout le volume du liquide tandis que l'évaporation ne concerne que la couche surfacique. Entraînées par un mouvement de convection, les bulles finissent par être libérées dans l'atmosphère.
 - La modélisation en termes moléculaires représente la matière sous la forme de molécules. D'après ce modèle, la source de chaleur, quelle que soit sa nature, est constituée de molécules avec une très grande agitation (par rapport à celle des molécules d'eau). Pendant la première partie de l'expérience, les collisions de proche en proche des molécules très agitées de la source produisent un surplus d'agitation moyenne des molécules d'eau : au niveau macroscopique, cela se traduit par une augmentation de la température. Puis, ce surplus d'agitation devient tellement important qu'il conduit à la rupture des liaisons intermoléculaires entre les molécules d'eau : au niveau macroscopique, cela se traduit par les premières

bulles de vapeur d'eau et la stagnation de la température (puisque l'agitation des molécules cesse de croître).

- La modélisation en termes énergétiques repose sur un bilan énergétique de la situation. L'ébullition, comme l'évaporation, nécessite une substantielle quantité d'énergie pour faire passer une quantité d'eau liquide en vapeur d'eau : c'est la chaleur latente de vaporisation. Pendant la première partie de l'expérience, le transfert énergétique entre la source de chaleur et l'eau liquide sert à augmenter l'énergie interne de l'eau liquide, d'où l'augmentation de température perçue. Lorsqu'elle commence à stagner, cela signifie que le flux énergétique entre la source de chaleur et l'eau liquide sert désormais à transformer l'eau liquide en vapeur d'eau. Un gaz possède une énergie interne supérieure à celle du liquide, pour une masse et une température donnée : la différence entre l'énergie interne du gaz et l'énergie interne du liquide correspond à la chaleur latente de vaporisation.

Par différents moyens, l'ensemble de ces modélisations relie de façon causale la stabilisation de la température de l'eau et le changement d'état qu'elle subit.

6.2 Les obstacles épistémologiques relatifs à la vapeur d'eau, l'eau liquide, l'évaporation, la condensation et l'ébullition

6.2.1 Les obstacles épistémologiques relatifs à la vapeur d'eau et l'eau liquide

Les obstacles liés à l'eau liquide sont peu nombreux, car la catégorisation de l'eau à l'état liquide du langage scientifique et du langage de la vie quotidienne se recouvrent en grande partie. Les mers, océans, fleuves, rivières, lacs, flaques, eau du robinet, etc. sont spontanément classés comme de l'eau liquide, par le scientifique ou le novice. Ce consensus masque le fait que les critères utilisés sont différents, même s'ils aboutissent au même classement. Cette divergence s'expose au grand jour lorsqu'il s'agit de catégoriser certains objets : brouillard, nuages, buée, rosée. Pour le scientifique, ces objets sont des gouttelettes d'eau liquide soit en suspension soit sur un support. Pour le novice, la situation est beaucoup plus ambiguë : le brouillard et les nuages sont blancs, alors que l'eau liquide « habituelle » est incolore ; on ne peut pas mettre brouillard, nuages, buée, et rosée dans un récipient, ils n'ont pas une surface libre plane et horizontale, comme les liquides usuels ; le brouillard et les nuages occupent un grand volume non délimité dans l'espace, un peu à la manière des gaz, etc. Le comportement de ces objets liquides est insolite, pour qui a l'habitude de côtoyer l'eau liquide dans des petits contenants ou à la surface de la Terre sous forme de fleuves, d'océans ou de lacs. Il est possible que, pour le novice, les propriétés de ces objets se rapprochent davantage de celles des gaz que des liquides.

Les obstacles liés à la vapeur d'eau sont plus nombreux. Ils proviennent d'abord de ses caractéristiques en tant qu'état gazeux : il s'agit de concevoir que le gaz (et par inclusion la vapeur d'eau) constitue de la matière, au même titre que les liquides et les solides et ce, alors même que ses propriétés diffèrent largement des autres membres de la famille « matière ». En

effet, bon nombre de gaz (dont la vapeur d'eau) sont invisibles et inodores, et lorsqu'ils sont statiques, imperceptibles. Le fait que le gaz soit considéré comme pesant est plutôt contre-intuitif, si l'on considère, par exemple, qu'un ballon de baudruche gonflé pèse moins lourd qu'un ballon non gonflé, à cause de la poussée d'Archimède. D'autre part, la notion de gaz est bien souvent assimilée à la notion d'air, seul exemple familier d'état gazeux.

Mais les difficultés liées à la vapeur d'eau ne s'arrêtent pas là, puisque, une fois admis que la vapeur est invisible, inodore et imperceptible, il faut se convaincre qu'il s'agit simplement d'une « forme d'eau particulière ». Or, cette forme d'eau ne possède en apparence aucune des caractéristiques de l'eau sous forme liquide et sous forme solide. Pour se convaincre qu'un glaçon est aussi une « forme d'eau particulière », il suffit de le regarder fondre, puis de nouveau se solidifier : la continuité, et surtout la réversibilité de l'expérience vécue lorsque l'eau solide devient liquide (et inversement) emporte la conviction qu'il s'agit de la même substance chimique, en dépit de leurs propriétés apparemment dissemblables. Mais dans le cas de la transition eau liquide-vapeur d'eau, la seule observation est une disparition d'eau liquide dans certaines conditions (évaporation des flaques) ou une apparition d'eau liquide dans d'autres conditions (brouillard, nuages, buée, rosée). L'évaporation et la condensation se déroulent de manière spatialement et temporellement découplées. Ces conditions (ajoutées à la difficulté à reconnaître que le brouillard, les nuages, la rosée, etc. sont de l'eau à l'état liquide) rendent la réversibilité de la transition eau liquide-vapeur d'eau beaucoup plus difficile à établir que dans le cas de la transition eau liquide-eau solide. Enfin, les propriétés de l'eau à l'état gazeux ne peuvent pas vraiment être observées car on ne peut isoler la vapeur d'eau de l'air environnant dans les conditions de la classe. Toutes ces restrictions rendent difficiles la conceptualisation de la vapeur d'eau.

6.2.2 Les obstacles épistémologiques relatifs à l'évaporation et la condensation

L'interprétation des phénomènes d'évaporation et de condensation pose plusieurs obstacles potentiels :

- Il faut d'abord reconnaître que les phénomènes d'évaporation et de condensation relèvent d'une transformation physique de la matière. Cette interprétation entre en concurrence avec une autre possible : une disparition définitive d'eau, dans le cas de l'évaporation et une apparition, dans le cas de la condensation. L'idée de la conservation de la matière (la matière ne peut ni apparaître ni disparaître mais uniquement se transformer) est donc incontournable pour arriver à la modélisation scientifique de ces phénomènes : lors de l'évaporation, l'eau ne disparaît pas, elle se transforme en quelque chose d'autre. Lors de la condensation, l'eau n'apparaît pas, elle s'est transformée à partir de quelque chose d'autre. La nature de « ce quelque chose d'autre » reste à déterminer. Une fois accepté ce postulat théorique, la nature des investigations à mener à propos de ces phénomènes se restreint : il s'agit alors de chercher ce en quoi l'eau liquide se transforme.
- Il s'agit ensuite de se convaincre que ces phénomènes relèvent d'un changement d'état, au détriment d'interprétations concurrentes : absorption de l'eau liquide par son support

(terre, goudron, verre, etc.) dans le cas de l'évaporation, par exemple. D'autre part, se convaincre que les phénomènes d'évaporation et de condensation relèvent d'un changement d'état signifie reconnaître que la substance chimique en présence (l'eau) subsiste à travers les modifications observées. Nous avons déjà souligné combien la conceptualisation de la vapeur d'eau est difficile, en raison des propriétés générales de l'état gazeux, mais aussi du manque de perception directe de la réversibilité de la transition vapeur-liquide, et du fait que cette forme d'eau ne possède plus en apparence aucune des caractéristiques de l'eau sous forme liquide et sous forme solide. Ces difficultés peuvent éclairer les conceptions largement répertoriées dans la littérature (Osborne & Cosgrove, 1983 ; Lee & al., 1993 ; Johnson, 1998a, 1998b ; Bar & Galili, 1994 ; Bar & Travis, 1991 ; Paik, 2015 ; Séré & Tiberghien, 1989 ; Coştu & Ayas, 2005 ; Tytler, 2000 ; Prain & al, 2009 ; Tytler & Peterson, 2001 ; Holgersson & Löfgren, 2004 ; Laval, 1985) (cf. 2.2.2 p. 65) : par exemple, puisque l'existence de la vapeur d'eau est difficilement conceptualisable, et si on admet la conservation de la matière, certains élèves évoquent l'air comme étant le « quelque chose » en quoi l'eau se transforme.

- Un préambule indispensable à l'interprétation des phénomènes de condensation concerne la présence de vapeur d'eau dans l'air environnant, celle-ci étant issue de l'évaporation des étendues d'eau liquide à travers le cycle de l'eau. Or, sans connaissances additionnelles (par exemple, savoir que l'air est un mélange de plusieurs gaz, y compris la vapeur d'eau), préjuger de la répartition d'une substance non-perceptible paraît difficile. D'autre part, il est possible que cette tentative se heurte à une connaissance superficielle du cycle de l'eau : dans les représentations scolaires classiques du cycle de l'eau (cf. Figure 14), les flèches qui symbolisent le trajet de la vapeur d'eau issue de l'évaporation présupposent un cheminement unilatéral. Il est alors tentant de décréter que la vapeur d'eau issue de toute évaporation se déplace directement vers le ciel pour aller créer les nuages. Selon cette modélisation naïve, il n'existerait pas de vapeur d'eau dans notre environnement proche : impossible alors de se représenter la buée contre les fenêtres comme issue de la condensation de la vapeur d'eau présente dans la pièce.

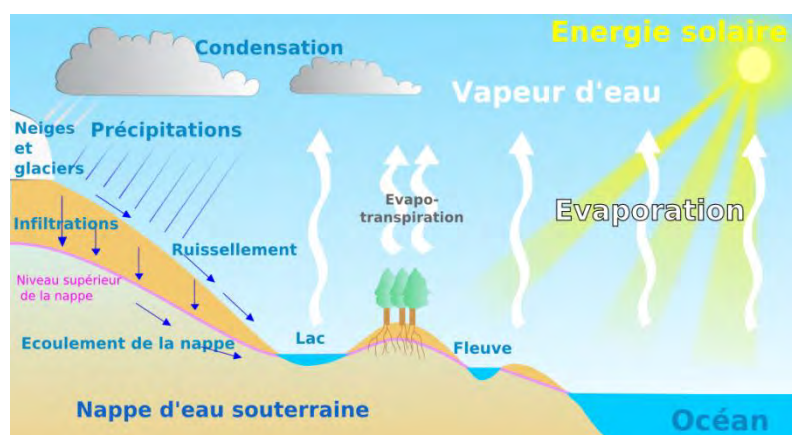


Figure 14 : Représentation classique du cycle de l'eau - Tiré de https://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle_de_l%27eau

- Un autre préambule indispensable à l'interprétation des phénomènes de condensation est la capacité de reconnaître les endroits où existe de l'eau à l'état liquide autour de nous. Autrement dit, il s'agit de réunir certains phénomènes (nuages, brouillards, brume, buée, rosée) et d'en exclure d'autres (fumée), au titre que les premiers font intervenir de l'eau liquide. Nous avons déjà souligné combien cette catégorisation était malaisée, au vu de l'ambiguïté des caractéristiques de ces objets liquides, ambiguïtés pouvant amener à les confondre avec des objets gazeux ou solides.

Au final, la familiarité avec les phénomènes d'évaporation et de condensation, qui s'observent en permanence dans la vie quotidienne, n'est pas garant d'un enseignement facilité, bien au contraire.

6.2.3 Les obstacles épistémologiques relatifs à l'ébullition

L'interprétation du phénomène d'ébullition pose plusieurs obstacles potentiels : certains concernent uniquement l'interprétation en termes de vaporisation, d'autres concernent l'interprétation relative au palier de température, c'est-à-dire celle liant ébullition de l'eau liquide et stagnation de la température.

Pour interpréter le phénomène d'ébullition :

- Il faut d'abord identifier la nature des bulles qui apparaissent tout au long de l'expérience. Pour cela, il faut d'abord savoir qu'une bulle est une poche remplie de gaz ; c'est un des rares cas où un gaz invisible est rendu « perceptible ». D'autre part, à l'œil nu, discriminer une bulle d'air (initialement dissous dans l'eau, qui apparaît dès le début du chauffage) et une bulle de vapeur d'eau n'est pas possible : les deux ont le même aspect, seule la taille varie dans le contexte de cette expérience. Enfin, les remous/bouillons (bulles prises dans un mouvement de convection) qui apparaissent aux alentours de 100°C ne ressemblent pas tout à fait aux bulles plus « statiques » que l'on a l'habitude de voir (les bulles de boissons gazeuses, les bulles de savons, etc.) : l'assimilation des remous/bouillons à des bulles n'est pas évidente.
- Il faut ensuite discriminer le moment du début de l'ébullition et identifier la simultanéité de ce début avec la stagnation de la température.

Mais, nous l'avons souligné, comme rien ne discrimine visuellement les bulles d'air et d'eau (à part la taille) et que les bouillons sont difficiles à identifier en tant que bulles, il n'est pas évident de situer le début de l'ébullition. En effet, la présence de bulles qui se succèdent tout le long du phénomène (bulles d'air dissous à partir de 30-40°C, bulles de vapeur d'eau qui se recondensent immédiatement vers 80-90°C, bulles de vapeur d'eau sous forme bouillonnante vers 100°C) ne facilite pas la reconnaissance de la coïncidence temporelle entre l'ébullition et la stagnation de la température. Enfin, la présence de buée sur les parois du récipient, qui apparaît très tôt dans l'expérience (dès 40°C) est le témoin de la condensation de la vapeur d'eau créée par évaporation (et non par ébullition), évaporation accélérée par le chauffage de l'eau. L'apparition de la buée est de nature à

brouiller les pistes entre évaporation et ébullition, et à rendre laborieux la reconnaissance du début de l'ébullition.

- Enfin, il s'agit d'aller au-delà d'une corrélation contingente entre ébullition et stagnation de la température pour aller vers la reconnaissance d'un lien nécessaire entre les deux.

En effet, même si la coïncidence est reconnue, d'autres facteurs que le changement d'état en lui-même peuvent être envisagés pour expliquer la stagnation de la température : par exemple, si l'on amalgame température et chaleur (dans le sens de transfert thermique), conception largement explorée dans la littérature de didactique des sciences (Laval, 1985), on peut alors penser que la température (comme la chaleur) est proportionnelle à la quantité d'eau. Ce serait alors la diminution de la quantité d'eau liquide lors de l'ébullition qui serait la cause de la stabilisation de la température (et non le changement d'état). Le lien entre ébullition et palier de température est donc à construire.

Au final, si l'expérience d'ébullition est une expérience simple à mettre en œuvre avec du matériel basique, son interprétation est loin d'être triviale et exige des élèves et de l'enseignant un travail de problématisation des données empiriques, adossé à des savoirs que les élèves ne peuvent découvrir seuls.

6.2.4 Les obstacles épistémologiques relatifs au modèle moléculaire des états de la matière

La manipulation du modèle moléculaire est susceptible d'entraîner des difficultés, quel que soit le phénomène sur lequel il est censé s'appliquer. S'il est inenvisageable d'enseigner un modèle moléculaire dans une perspective constructiviste radicale, son introduction entraîne inévitablement une discontinuité dans les manières de penser la matière et ses transformations. Nous explicitons les raisons dans la suite.

Dans le modèle moléculaire, les molécules sont souvent décrites comme de petites sphères rigides, en mouvement, libres (dans le cas des gaz) ou liées entre elles par des liaisons, parfois représentées symboliquement par des traits ou physiquement par des tiges ou des ressorts (dans le cas des solides ou des liquides). Ce modèle appartient au registre des modèles analogiques (par opposition aux modèles mathématiques), dans le sens où il s'agit d'une représentation simplifiée de la réalité. Il charrie plusieurs difficultés potentielles :

- Ce modèle transpose des objets macroscopiques au monde microscopique (boules rigides, tiges, etc.). Si cela présente l'avantage de rendre le modèle facilement appréhendable, cette transposition brouille le discernement des contours d'application du modèle. Par exemple, comment envisager qu'une molécule, pourtant illustrée par une boule rigide, ne constitue pas pour autant un solide ? Autre exemple : les tiges élastiques qui correspondent aux liaisons intermoléculaires entre les molécules des liquides et des solides comportent le risque d'être substantialisées alors qu'il ne s'agit que de la représentation d'une force de nature électrostatique qui agit à distance et qu'il n'existe rien de matériel qui attache les molécules entre elles. Le novice ne peut, a priori, faire la différence entre les caractéristiques du modèle qui sont utilisables et fructueuses pour expliquer les

phénomènes macroscopiques et celles qu'il doit abandonner car elles constituent des limites à la modélisation.

- Le modèle moléculaire impose de penser la matière comme discontinue alors que les objets autour de nous ne présentent pas du tout cet aspect. D'autre part, ce sont les propriétés émergentes du comportement collectif des molécules qui rendent compte des faits macroscopiques. Par exemple, la température émerge de l'agitation moyenne des molécules et évoquer la température d'une molécule est absurde ; c'est l'augmentation de la distance moyenne entre molécules qui permet d'interpréter la dilatation des solides et non le grossissement des molécules individuelles ; une molécule n'a pas de couleur mais la couleur d'un objet émerge de l'interaction entre les ondes électromagnétiques et les molécules, etc. Ces manières d'envisager le monde naturel (discontinuité, propriétés émergentes) ne se retrouvent pas dans la vie quotidienne : elle constitue une nouveauté absolue pour qui envisage l'apprentissage des propriétés de la matière et elle exige un temps d'appropriation pour développer des modes de penser spécifiques. Ces considérations peuvent éclairer les conceptions répertoriées dans la littérature (par exemple, le fait que certaines propriétés macroscopiques de substances soient importées à l'échelle microscopique ; cf. 2.2.2).
- Le modèle moléculaire permet d'expliquer, d'interpréter et/ou de prévoir de nombreux phénomènes faisant intervenir des transformations de la matière. Néanmoins, la cartographie dynamique fine du mouvement des molécules est parfois difficile à se représenter, car elle met en jeu des effets statistiques qui dépassent l'imagination. Prenons l'exemple du rôle de l'air environnant dans l'évaporation selon le modèle moléculaire. Il est impossible, au vu de la direction et du sens de la quantité de mouvement des molécules de l'air qui se trouvent autour du liquide à évaporer, qu'elles puissent « arracher » directement les molécules du liquide. Néanmoins, nous l'avons remarqué plus haut : les molécules de l'air jouent un rôle majeur dans l'évaporation, non pas par arrachement direct des molécules du liquide, mais à travers une transmission de mouvement microscopique beaucoup plus « aléatoire », c'est-à-dire par collision désordonnée des molécules de l'air avec celles du liquide, ce qui permet de fournir l'énergie nécessaire pour maintenir constante la température du liquide. Ce genre de raisonnement nécessite une analyse subtile de la dynamique statistique du mouvement des molécules, difficile pour des novices. Dans le monde savant, cette analyse est d'ailleurs suppléée par des modèles numériques, qui permettent de se libérer des limites de l'imagination.

Chapitre 7 ANALYSE EMPIRIQUE D'UNE CLASSE AU PRIMAIRE EN SUISSE ROMANDE : AMÉLIE

Après l'exposition des cadres théoriques et l'étude des contextes institutionnels relatifs à l'enseignement des sciences physiques en Suisse romande et en France, qui ont permis de soutenir la problématique et les questions de recherche, ce chapitre inaugure le travail empirique, élément central de la thèse, à travers deux études de cas. Le premier développe l'analyse empirique d'une classe au primaire en Suisse romande (la classe d'Amélie, cf. Chapitre 7) et le second l'analyse d'une classe au primaire en France (la classe de Louise, cf. Chapitre 8).

La proximité des thématiques qu'abordent les deux enseignantes du primaire nous conduit à prendre pour focale d'étude la dynamique de co-construction et d'évolution de la notion de vapeur d'eau tout au long de la séquence, pour laquelle l'analyse issue de la littérature de didactique des sciences (cf. 2.2) et celle des obstacles épistémologiques (cf. 6.2) ont montré l'intérêt en termes de défi et de potentiel d'apprentissage.

Avant d'entrer dans la matière des études empiriques, nous présentons les principes organisateurs qui président aux analyses de ce chapitre et du chapitre suivant :

- Nous commençons par présenter le contexte de la recherche, en donnant quelques repères par rapport à l'enseignant, l'école et la classe.
- Puis, l'outil qui initie l'étude *in situ* est le synopsis qui rend compte d'un seul coup d'œil de l'articulation des enjeux visés par l'enseignant et de l'action des participants. Nous exposons globalement la séquence observée en fournissant un premier synopsis à l'échelle macroscopique. Certains des enjeux de la séquence sont étudiés de façon plus approfondie : nous faisons correspondre à ces enjeux un (ou plusieurs) autre(s) synopsis, à un niveau mésoscopique. Deux échelles d'analyse sont ainsi balayées, et aboutissent aux choix des phases d'action pertinentes vis-à-vis de la focale d'étude.
- Avant d'analyser ces phases d'action au niveau microscopique, nous complétons l'analyse des savoirs en jeu et des obstacles épistémologiques (analyse a priori de premier niveau, cf. 6.2) avec un second niveau d'analyse a priori : il s'agit de l'analyse des tâches que proposent les enseignantes et des situations dans lesquelles sont placés les élèves.
- Puis, pour chaque phase d'action, un ou plusieurs extraits significatifs sont analysés, à l'aide du croisement des outils de l'action conjointe et du premier et second niveau de l'analyse a priori (cf. 5.4.3.2).
- Enfin, une synthèse des différents extraits est menée : elle révèle la dynamique générale de construction des savoirs ainsi que les schémas d'action de l'enseignant et des élèves à travers la mise en avant de régularités et de généralités

Nous présentons le contexte de la classe d'Amélie, en donnant quelques repères par rapport à l'école et la classe ainsi que l'enseignante.

7.1 Présentation du contexte de la classe d'Amélie

7.1.1 L'école et la classe

L'école primaire se situe à Genève. La classe observée correspond au niveau 6^{ème} Primaire (c'est-à-dire des élèves âgés de 9 à 10 ans). Elle comprend 20 élèves.

Selon l'enseignante, le milieu social d'origine des élèves est plutôt hétérogène. La classe ne présente pas de difficultés particulières.

7.1.2 L'enseignante

Amélie a obtenu un master en psychologie de l'université de Genève, puis a enchaîné par un travail dans le milieu social pour favoriser l'insertion des jeunes en rupture scolaire ou familiale. Parallèlement, elle a effectué pendant huit ans des remplacements de longue durée dans des écoles primaires dont elle est familière de tous les degrés.

Elle enseigne à plein temps dans l'école filmée depuis quatre ans. Elle a suivi une formation à l'IUFE (Institut Universitaire de Formation des Enseignants) pendant deux ans où elle a surtout bénéficié d'enseignements de didactique.

Amélie occupe un poste d'enseignante complémentaire : elle enseigne une moitié de son temps toutes les disciplines à une classe de 5P – 6P et l'autre moitié de son temps les sciences et l'allemand à quatre autres classes du cycle 2 (dont la 6P filmée). Ces postes d'enseignant complémentaire, qui ont été créés à Genève à la suite de l'ouverture des classes le mercredi matin, aboutissent souvent à des semi-spécialisations en sciences, allemand ou histoire, comme dans le cas d'Amélie. Celle-ci affirme apprécier son statut d'enseignante complémentaire car il lui permet de traiter des sujets spécifiques en profondeur. Elle regrette cependant l'impossibilité de les traiter de manière transversale.

Amélie affirme se servir de ressources d'origine diverse : hormis le PER qu'elle consulte, elle utilise les moyens d'enseignements, les ressources françaises ou canadiennes trouvées sur Internet, les manuels scolaires étrangers, etc.

7.2 Présentation générale des séances observées

La partie observée dans la classe d'Amélie correspond à cinq séances d'une heure et demie, pour un total de sept heures filmées.

Elle s'insère dans une séquence qui vise à permettre l'étude des propriétés des états de l'eau, des changements d'état de l'eau et des mélanges aqueux, d'une part et l'étude de la gestion de l'eau par les individus et les sociétés, d'autre part (cf. Tableau 4, p. 150). Des productions écrites relatives à cette séquence (les documents distribués aux élèves, l'évaluation finale) se trouvent dans l'annexe A.

Le premier enjeu de niveau N+1 « Etude des propriétés des états de l'eau, des changements d'état de l'eau et des mélanges aqueux » peut être décomposé en différents sous-enjeux de niveau N plus locaux : le premier introduit la catégorisation des états de la matière (N1) ; le second est relatif aux propriétés des liquides et des solides (N2) ; le troisième concerne les transitions solide-liquide de l'eau (N3) ; le quatrième a trait à l'état gazeux et aux changements d'état liquide-gaz de l'eau (N4) ; le cinquième concerne l'utilisation de la catégorisation des états de la matière pour décrire l'eau dans la nature (N5) et enfin le sixième (non filmé) porte sur les mélanges aqueux (N6).

Le second enjeu de niveau N+1 « Etude de la gestion de l'eau par les individus et les sociétés » peut être décomposé en trois enjeux de niveau inférieur N : le premier concerne les modes d'utilisation et de consommation de l'eau et le trajet de l'eau domestique en Suisse romande (N7) ; le second est relatif à la gestion de l'eau dans différentes parties du monde (N8) et enfin, le troisième porte sur les manières d'économiser l'eau dans la vie quotidienne (N9).

Ces différents découpages sont résumés dans le synopsis ci-dessous (cf. Tableau 4, p. 150) :

Enjeux de la séquence (niveau N+1)	Enjeux de niveau N
Etude des propriétés des états de l'eau, des changements d'état de l'eau et des mélanges aqueux	Introduction de la catégorisation des états de la matière (solide, liquide, gaz) S1 [46 min] N1
	Etude des propriétés des liquides et des solides S1-S2 [50 min] N2
	Etude des propriétés des transitions solide-liquide de l'eau S3 [84 min] N3
	Etude de l'état gazeux et des propriétés des transitions liquide-gaz de l'eau S3 [86 min] N4
	Utilisation de la catégorisation des états de la matière pour classer l'eau dans la nature S4 [16 min] N5
	Etude des propriétés des mélanges aqueux <i>Non filmé</i> N6
Etude de la gestion de l'eau par les individus et les sociétés	Etude des modes d'utilisation et de consommation de l'eau & du trajet de l'eau domestique en Suisse romande S5 [22 min] N7
	Etude de la gestion de l'eau dans les différentes parties du monde S5 [10 min] N8
	Etude des manières d'économiser l'eau dans la vie quotidienne S5 [8 min] N9

Tableau 4 : Synopsis de la séquence de la classe d'Amélie

Puisque nous visons à retracer comment la notion de vapeur d'eau se construit dans la classe, en lien avec les changements d'état qu'elle subit, nous nous intéressons aux enjeux qui correspondent aux parties grisées du Tableau 4 : l'introduction de la catégorisation des états de la matière (N1) ; l'étude de l'état gazeux et des propriétés des transitions liquide-gaz pour l'eau (N4) ; et l'utilisation de la catégorisation des états de la matière pour décrire l'eau dans la nature (N5). Nous les analysons en détail ci-dessous.

7.3 Présentation des enjeux étudiés : N1, N4 et N5

Chacun de ces trois enjeux est découpé en plusieurs sous-enjeux, chacun donnant lieu à plusieurs phases d'action (cf. Tableau 5, p. 152).

7.3.1 Description générale de l'enjeu (N1) : Introduction de la catégorisation des états de la matière (solide, liquide, gaz)

L'enjeu (N1) se décompose en plusieurs enjeux de niveau inférieur : l'identification du thème d'étude (N11), la description et dénomination de l'eau dans la nature à travers 20 photographies (N12), et l'introduction de la catégorisation des états de la matière (N13). Ces différents enjeux sont décrits avec davantage de détails (phases d'action, apports principaux dans la mésogenèse, éléments institutionnalisés, empan temporel, organisation sociale de la classe) dans le synopsis ci-après (cf. Tableau 5).

Enjeux de niveau N	Enjeux de niveau N-1	Phases d'action <i>Apports principaux dans la mésogenèse en termes de contenus</i> Resultats d'institutionnalisation en gras Organisation sociale- Empan temporel
Introduction de la catégorisation des états de la matière (solide, liquide, gaz) N1	Identification du thème d'étude : les formes que peut prendre l'eau N11	Introduction du nouveau thème & Consigne <i>Le nouveau thème d'étude est l'eau.</i> <i>Consigne : dessiner ou écrire toutes les choses auxquelles vous pensez à propos de l'eau</i> On rencontre l'eau à plein d'endroits différents. Collectif - S1(20' – 23') N11a
		Représentation et/ou rédaction des idées à propos de l'eau Individuel - S1(23' – 27') N11b
		Mise en commun des idées à propos de l'eau & identification du thème d'étude <i>Idées à propos de l'eau : Couleur bleue/ La piscine/ À boire/ Transparent/ Liquide/ La mer/ La vie/ La neige/ La glace/Une bouteille/ Beau/ Tsunami/ Jacuzzi/ Etc.</i> Le nouveau thème d'étude est les formes que peut prendre l'eau. Collectif - S1(27' – 30') N11c
	Description et dénomination de l'eau dans la nature à travers 20 photographies N12	Contexte de l'étude & Consigne <i>Consigne : dans les photographies 1 à 20, où se trouve l'eau ? Sous quelle forme est l'eau ?</i> Collectif - S1(30' – 31') N12a
		Identification de l'endroit où se trouve l'eau et dénomination du phénomène sur les 20 photographies 1 Rosée/ 2 verglas/ 3 Iceberg/ 4 Glaçons/ 5 Vapeur d'eau/ 6 Givres sur les voitures/ 7 Brouillard/ 8 Nuages/ 9 Pluie/ 10 Mer/ 11 Lac/ 12 Rivière/ 13 Glacier/ 14 Banquise/ 15 Gelée/ 16 Buée/ 17 Brume/ 18 Cristal de glace/ 19 Neige/ 20 Grêlons Collectif - S1(31' – 40') N12b
	Introduction de la catégorisation des états de la matière (solide, liquide, gaz) N13	Consigne <i>Consigne : ranger les photographies par catégorie ; mettre ensemble celles qui vont bien ensemble ; puis nommer les catégories obtenues</i> Collectif - S1(40' – 43') N13a
		Classement des photographies par catégories et dénomination des catégories Groupe - S1(43' – 51') N13b
		Mise en commun des catégorisations des 20 photographies & introduction de la catégorisation privilégiée : liquide, solide, gaz <i>Groupe Eni : vapeur (7 ; 17 ; 5 ; 16 ; 8)/ dur (3 ; 18 ; 4 ; 15 ; 2)/ liquide (10 ; 11 ; 12)/ce qui tombe (20 ; 1 ; 9)/les mous (14 ; 6 ; 13). Etc.</i> Il existe plusieurs manières de catégoriser. Au niveau scientifique, on utilise trois catégories liées à l'état de l'eau : liquide (la plus familière), solide, gaz. Ce que vous avez appelé vapeur, évaporé, fantôme, transparent, c'est le gaz Collectif - S1(51' – 66') N13c

Tableau 5 : Synopsis de l'enjeu N1 « Introduction de la catégorisation des états de la matière (solide, liquide, gaz) »

Enjeu N11 : Identification du thème d'étude

Le traitement de cet enjeu se déroule en plusieurs phases d'action :

- Dans la première phase qui se déroule en collectif (N11a), Amélie demande aux élèves de dessiner ou écrire toutes les choses auxquelles ils pensent à propos de l'eau.
- Dans la seconde phase (N11b), les élèves représentent ou écrivent ce que l'eau évoque pour eux.
- Dans la troisième phase (N11c), une synthèse collective a lieu et mène au recueil d'une diversité de mots ayant trait à l'eau : couleur bleue ; piscine ; à boire ; la mer ; la vie ; le bateau ; une bouteille ; jacuzzi ; tsunami, etc. À l'issue de cette phase, l'enseignante déclare que le nouveau thème d'étude de cette unité d'enseignement, ce sont les formes que peut prendre l'eau.

Enjeu N12 : Description et dénomination de l'eau dans la nature à travers 20 photographies

- Dans la première phase qui se déroule en collectif (N12a), Amélie annonce qu'elle va montrer au vidéoprojecteur 20 photographies qui font intervenir des objets / phénomènes liés à l'eau (cf. Tableau 6). Elle demande aux élèves de situer où se trouve l'eau sur ces photographies et sous quelle forme.
- Dans la seconde phase (N12b), Amélie et les élèves décrivent sommairement les objets / phénomènes présents sur les photographies. Un nom est donné à chacun d'entre eux (cf. Tableau 6).

1	Rosée	8	Nuages	15	Gelée
2	Verglas	9	Pluie	16	Buée
3	Iceberg	10	Mer	17	Brume
4	Glaçons	11	Lac	18	Cristal de neige
5	Vapeur d'eau	12	Rivière	19	Neige
6	Givre	13	Glacier	20	Grêlons
7	Brouillard	14	Banquise		

Tableau 6 : Contenu des 20 photographies de l'eau dans la nature que les élèves doivent désigner

Enjeu N13 : Introduction d'une catégorisation de l'eau dans la nature (solide, liquide, gaz)

- Dans la première phase qui se déroule en collectif (N13a), Amélie distribue les 20 photographies précédemment introduites dans chaque groupe. Chaque photographie a été découpée individuellement. Elle demande aux élèves de les ranger par catégorie, puis de nommer les catégories obtenues.

- Dans la phase suivante (N13b), les élèves, par groupe de trois, rassemblent les photographies qui « vont bien ensemble » et trouvent des dénominations pour chaque catégorie.
- Dans la dernière phase (N13c), chacun des groupes rapporte à la classe son système de catégorisation des photographies. Au final, il est convenu qu'il existe plusieurs manières de catégoriser, mais qu'au niveau scientifique, on utilise une classification liée à l'état de l'eau. L'eau peut se trouver sous trois états : liquide, solide, gazeux. Cette phase est la première qui sera analysée au niveau microscopique (cf. partie grisée dans le Tableau 5, p. 152).

À la suite de cette institutionnalisation de la classification des états de la matière, plusieurs enjeux de niveau N, que nous ne développons pas ici, concernent les caractéristiques de l'eau liquide et de l'eau solide ainsi que des propriétés de la transition liquide-solide : l'eau liquide est notamment reconnue comme déformable, capable de couler, avec une surface libre horizontale et impossible de tenir dans la main.

7.3.2 Description de l'enjeu (N4) : Etude de l'état gazeux et des propriétés des transitions liquide-gaz pour l'eau

L'enjeu N4 est constitué de plusieurs enjeux de niveau inférieur : l'étude de l'ébullition (N41 et N43), l'étude de l'évaporation (N42), l'étude d'un paradoxe apparent sur le cycle de l'eau (N44) et enfin, l'étude de la condensation (N45). Ces différents enjeux sont décrits avec davantage de détails dans le synopsis ci-dessous (cf. Tableau 7, p. 155).

Enjeux N41 et N43 : L'étude de l'ébullition

L'étude de l'ébullition est séparée en deux intervalles de temps distincts que nous réunissons ci-après pour le décrire :

- Dans la première phase qui se déroule en collectif (N41a), Amélie délimite le nouveau thème d'étude : il s'agit de l'eau sous forme de gaz. Elle demande aux élèves de représenter et de décrire une expérience dans laquelle de l'eau liquide se transforme en eau sous forme gazeuse.
- Dans la deuxième phase (N41b), les élèves s'essaient individuellement à la mise au point d'une expérience de transition liquide-gaz.
- Dans la troisième phase (N41c), certaines idées d'expériences sont soumises au collectif. Il est finalement reconnu qu'il faut chauffer l'eau liquide pour la transformer en gaz. Un type d'expérience se dégage : mettre une casserole d'eau sur une plaque électrique ou bien utiliser une bouilloire.
- Dans la dernière phase qui se déroule collectivement (N43a), une bouilloire remplie d'eau est mise en place et branchée. Certains constats sont tirés de l'observation du comportement de l'eau lorsqu'elle est chauffée : les grosses bulles qui apparaissent signalent l'ébullition. Celle-ci se produit vers 100°C et s'accompagne d'un petit nuage. Mais de l'évaporation se produit dès le début de l'expérience. L'eau sous forme de gaz est invisible.

Les deux phases précédentes (N41c) et (N43a) constituent le deuxième segment qui sera analysé au niveau microscopique (cf. les deux premières parties grisées dans le Tableau 7, p. 155).

Enjeu N42 : L'étude de l'évaporation

Sans rentrer dans le détail des nombreuses phases de cet enjeu que nous n'étudierons pas plus avant dans la suite, précisons quelques éléments de l'avancée des savoirs.

Cet enjeu permet d'aborder l'évaporation : il y est établi que l'eau s'évapore lorsqu'elle est laissée à l'air libre et que deux facteurs (la chaleur et l'air) influencent la vitesse d'évaporation. Le sèche-linge et l'étendage traditionnel du linge font d'ailleurs intervenir ces deux facteurs. D'autre part, l'évaporation est une manière naturelle d'évaporer l'eau : toutes les étendues d'eau dans la nature (lac, mer, etc.) s'évaporent et cette dynamique contribue au cycle de l'eau.

Enjeu N44 : L'étude d'un paradoxe apparent

Dans ce court enjeu d'enseignement qui ne comporte qu'une seule phase en collectif (N144a), Amélie soumet un paradoxe apparent aux élèves : pourquoi est-on capable de voir l'eau descendre des nuages sous forme de pluie mais jamais effectuer le trajet inverse pour former les nuages ? Une raison est avancée : c'est parce que, lorsqu'elle remonte dans le ciel, elle est dans l'état gazeux et donc invisible à l'œil nu.

Enjeu N45 : L'étude de la condensation

Cet enjeu d'enseignement ne comporte qu'une seule phase qui se déroule en collectif (N45a) : Amélie demande aux élèves d'imaginer des moyens de transformer de la vapeur d'eau en eau liquide.

Après l'étude de quelques suggestions, il est décidé qu'il faut placer un objet froid au contact de la vapeur. Une première expérience est menée : aux abords d'une bouilloire remplie d'eau chauffée, un miroir froid est placé. De la buée se forme sur le miroir : celle-ci est constituée de petites gouttes d'eau, et est le témoin de la transition vapeur d'eau-eau liquide.

Dans une deuxième expérience, un récipient d'eau chaude est recouvert par un saladier froid. Il en ressort que la buée qui apparaît sur les parois du saladier montre également que la vapeur d'eau redevient liquide. Cette deuxième expérience est censée modéliser la formation des nuages : ceux-ci ne sont pas faits de vapeur, ils sont à l'état liquide.

Cette phase est la troisième qui sera analysée au niveau microscopique. (cf. la dernière partie grisée dans le Tableau 7, p. 155).

7.3.3 Description générale de l'enjeu (N5) : Utilisation de la catégorisation des états de la matière pour décrire l'eau dans la nature

Ce dernier enjeu ne se sous-divise pas en enjeu de niveau inférieur. Il est décrit par le synopsis ci-dessous (cf. Tableau 8).

Enjeux de niveau N	Enjeux de niveau N-1	Phases d'action <i>Apports principaux dans la mésogenèse en termes de contenus</i> Résultats d'institutionnalisation en gras Organisation sociale- Empan temporel
Utilisation de la catégorisation des états de la matière pour classifier l'eau dans la nature N5	Utilisation de la catégorisation des états de la matière pour classifier l'eau dans la nature N51	Consigne de l'exercice <i>Consigne : Il faut classifier 10 images accompagnées de leur dénomination a) verglas, b) nuages, c) grêle, d) eau de la rivière, e) neige, f) brouillard, g) pluie, h) eau du robinet, i) vapeur d'eau invisible, j) iceberg sous un des trois états (solide, liquide, gaz).</i> Collectif - S4(69' – 75') N51a
		Classification des 10 images sous un des états de l'eau Individuel - S4(75' – 78') N51b
		Correction de l'exercice Verglas : solide / Grêle : solide / Eau de la rivière : liquide Neige : solide / Nuage : liquide / Brouillard : liquide / Pluie : liquide / Eau du robinet : liquide / Vapeur d'eau : gaz / Iceberg : solide Collectif - S4(78' – 85') N51c

Tableau 8 : Synopsis de l'enjeu N5 « Utilisation de la catégorisation des états de la matière pour décrire l'eau dans la nature »

Enjeu N51 : Utilisation de la catégorisation des états de la matière pour classifier l'eau dans la nature

- Dans la première phase qui se déroule en collectif (N51a), Amélie demande aux élèves de déterminer dans quel état physique est l'eau qui apparaît dans dix images, qui représentent des objets/phénomènes liés à l'eau. Une dénomination est déjà associée à chaque image (cf. Tableau 9).

a	Verglas	e	Neige	h	Eau du robinet
b	Nuages	f	Brouillard	i	Vapeur d'eau invisible
c	Grêle	g	Pluie	j	Iceberg
d	Eau de la rivière				

Tableau 9 : La dénomination des dix images représentant différents états de l'eau qu'il s'agit de déterminer

- Dans la deuxième phase (N51b), un petit temps de travail individuel est consacré à cette tâche.
- Dans la troisième phase (N51c), une correction de l'exercice est menée dans laquelle le verglas, la neige, la grêle, les icebergs sont catégorisés comme relevant de l'état solide. L'eau du robinet, les nuages, le brouillard, la pluie et l'eau de la rivière sont catégorisés comme étant de l'eau à l'état liquide. Seule la vapeur d'eau relève de l'état gazeux. Cette phase constitue la cinquième qui sera analysée au niveau microscopique (cf. la partie grisée dans le Tableau 8, p. 157).

7.3.4 Choix des phases étudiées

En résumé, nous effectuons l'analyse microscopique de cinq phases (cf. les parties grisées dans le Tableau 5, p. 152, le Tableau 7, p. 155 et le Tableau 8, p. 157).

- La première phase étudiée (N13c) introduit la catégorisation des états de la matière (solide, liquide, gaz) qui servent d'appui à la construction des savoirs tout au long de la séquence ;
- La deuxième phase (N41c) et la troisième phase (N43a) sont relatives à l'ébullition. La deuxième correspond à la mise en commun des idées des élèves quant à une expérience qui permettrait de transformer l'eau liquide en vapeur d'eau et au choix du protocole expérimental pertinent. La troisième traite de la mise en place et réalisation de l'expérience d'ébullition à travers le chauffage d'une bouilloire remplie d'eau, puis à son interprétation en termes de vaporisation ;
- La quatrième phase (N45a) s'occupe de la condensation : deux expériences successives qui donnent à voir ce phénomène sont mises en œuvre. Dans les deux cas, un objet froid est placé au contact de la vapeur et de la buée apparaît. Comme pour l'ébullition, ces expériences sont interprétées en termes de changement d'état de l'eau et de vapeur d'eau.

- Dans la dernière phase (N51c), les élèves doivent déterminer dans quel état physique est l'eau qui apparaît dans dix images, qui représentent des objets / phénomènes liés à l'eau. Ces 10 images représentent les mêmes phénomènes que les 20 photographies exposées dans la première phase (N13c). La consigne qui accompagne ces deux phases est très proche : dans la première, il s'agissait de trouver une catégorisation des 20 photographies ; dans la dernière, la catégorisation étant fournie (solide, liquide, gaz), les élèves doivent placer les images sous la catégorie appropriée. La proximité de ces deux tâches, l'une se situant en début de séquence et l'autre à la toute fin, donne une occasion idéale pour évaluer l'évolution des rapports aux objets des élèves sur les mêmes phénomènes, en particulier ceux qui concernent l'état gazeux et ses ambiguïtés (nuage, brouillard).

Nous avons choisi de traiter ces phases en profondeur dans la suite car leur analyse nous permet de retracer la dynamique de construction des savoirs relatifs à la vapeur d'eau, aux changements d'états qu'elle subit, et au traitement des objets ambigus (brouillard, nuages, etc.).

Avant de procéder à l'analyse microscopique de ces segments, nous questionnons le positionnement de la séquence observée par rapport aux documents institutionnels de référence.

7.3.5 Positionnement par rapport aux documents institutionnels de référence

On peut établir une connexion entre la nature des institutionnalisations ci-dessus et les parties suivantes du PER du sous-domaine « Phénomènes naturels et techniques » en 5P et 6P (cf. analyse plus détaillée du plan d'études au paragraphe 3.2).

<p>Expérimentation et mise en évidence de quelques propriétés de la matière dans ses états solide et liquide (<i>dureté, compressibilité, conservation de la masse lors d'un changement de forme, différence entre solide et liquide?...</i>)</p> <p>Expérimentation et mise en évidence de quelques propriétés du changement d'état de la matière dans sa transformation solide – liquide (<i>conservation de la masse lors d'un changement par le passage de liquide à solide? est-ce réversible? à quelles températures?...</i>)</p> <p>Observation des différentes formes de l'eau dans l'environnement (<i>pluie, brouillard, neige, givre,...</i>) et compréhension du cycle naturel de l'eau</p>	Attentes fondamentales
	Au cours, mais au plus tard à la fin du cycle, l'élève...
	<p>...identifie les changements d'état de l'eau et certaines de ses caractéristiques concernant son aspect, son volume, sa température</p> <p>...décrit le cycle naturel de l'eau</p> <p>...sait que l'air est une matière</p>

Figure 15 : Extrait du PER sur les propriétés de la matière en 6P

D'après l'intitulé des deux premières activités (à gauche, sur la Figure 15), l'étude au niveau 5P et 6P se concentre sur « les états solide et liquide » de l'eau et « le changement d'état dans sa transformation solide-liquide ». Autrement dit, l'état gazeux de l'eau n'est pas mentionné, ce qui signifie, qu'en choisissant de l'aborder explicitement dans la séquence filmée, Amélie fait un pas de côté par rapport aux prescriptions institutionnelles.

Cependant, la vapeur d'eau n'apparaît-elle pas en filigrane dans le plan d'études ? Il semble en effet incontournable d'y faire appel, d'une façon ou d'une autre, pour arriver à comprendre et décrire « le cycle naturel de l'eau » ou « les différentes formes de l'eau dans l'environnement », comme le préconise le PER (à droite et à gauche, sur la Figure 15). Amélie choisit de donner

une certaine cohérence à la séquence qu'elle propose en introduisant la vapeur d'eau préalablement au cycle de l'eau mais, puisque cet objet d'enseignement constitue un angle mort du PER, elle doit décider seule quoi enseigner sur ce thème et surtout, comment l'enseigner : le recours à des ressources, internes¹⁶ ou externes à la Suisse romande semble indispensable dans le processus de conception de sa séquence.

7.4 Analyse microscopique de cinq phases : N13c, N41c et N43a, N45a, N51c

7.4.1 Analyse de la première phase (N13c) : mise en commun des différentes catégorisations des 20 photographies & introduction de la catégorisation privilégiée (solide, liquide, gaz)

Contextualisation de l'Extrait A1 et l'Extrait A2

Après les avoir succinctement présentées et nommées au vidéoprojecteur, Amélie distribue 20 pastilles photographiques sur lesquelles s'affiche un objet / événement lié à l'eau dans l'environnement (nuages, neige, pluie, etc.) dans chacun des groupes.

Pour exemple, voici les photographies correspondant à l'iceberg (à gauche) et à la brume (à droite) :



Au-dessous des 20 pastilles photographiques est écrite la dénomination de l'objet / phénomène :

1	Rosée	8	Nuages	15	Gelée
2	Verglas	9	Pluie	16	Buée
3	Iceberg	10	Mer	17	Brume
4	Glaçons	11	Lac	18	Cristal de neige
5	Vapeur d'eau (fond blanc)	12	Rivière	19	Neige
6	Givre	13	Glacier	20	Grêlons
7	Brouillard	14	Banquise		

¹⁶ Notons que les moyens d'enseignement romands (MER) proposent de mettre à l'étude l'évaporation et l'ébullition sans jamais mentionner l'état gazeux de l'eau ou la vapeur d'eau.

Amélie a demandé à chacun des groupes de ranger les photographies par catégories et de nommer les catégorisations obtenues. Le segment analysé commence au moment où elle recueille les catégorisations des différents groupes.

Analyse a priori de la situation

La tâche inaugure la séquence sur les propriétés des états et des changements d'états de l'eau. En l'absence de référence déjà-partagée sur ce sujet, la situation porte potentiellement des possibilités d'un élargissement important du milieu à travers des classifications diversifiées amenées par les élèves : celles-ci peuvent être fondées sur l'apparence de l'eau, son état, son comportement, sa température, etc. L'enseignante devra donc trouver des moyens efficaces pour réduire le milieu si elle souhaite parvenir à la classification privilégiée des états de la matière.

Extrait A1 : propositions du premier groupe à intervenir lors de la mise en commun des différentes catégorisations des 20 photographies

354. Ens : chut/ ok/ chut// je vais demander à chaque groupe/ je vais vous demander combien de catégories vous avez trouvées et comment vous les avez appelées/ d'accord↑/ à chaque groupe je vais demander/ (...)/ chaque groupe vous allez dire le nombre de catégories et puis le nom/ enfin pourquoi vous les avez rangées comme ça/Enis vous les avez rangées comment↑/ combien de catégories↑
355. Eni: **la première catégorie c'est la vapeur**
356. Ens: combien de catégorie combien t'en as↑/ combien de groupes↑
357. Eni : 5
358. Ens : 5 groupes ok/ t'as quoi la famille vapeur ↑/c'est ça↑
359. Eni: (xxx)
360. Ens: dedans tu as mis↑ (écrit le nom de la catégorie au tableau)
361. Eni: **la brume/ brouillard/ la vapeur d'eau/ la buée / nuage**
362. Ens: d'accord autre famille↑/ vas-y/ décris les toutes s'il te plait
363. Eni: **ben la famille des durs**
364. Ens: la famille de ce qui est dur d'accord/ tu as mis quoi dedans↑/ vous avez mis quoi/ chut
365. Eni: **l'iceberg**
366. Ens: l'iceberg ouais
367. Eni: **les cristal de glace**
368. Ens: les cristaux de glace ouais
369. Eni: **les glaçons**
370. Ens: les glaçons
371. Eni: **la gelée blanche**
372. Ens: la gelée blanche d'accord
373. Eni: **et du verglas**
374. Ens: et du verglas/ ok on continue/ votre troisième et quatrième cinquième on y va
375. Eni: euh ben c'est **le liquide**
376. Ens: donc après la famille de ce qui est dur y a la famille de ce qui est liquide (écrit) /d'accord/ chut
377. Eni: **le lac la rivière et la mer**
378. Ens: ok encore/ vous en avez encore deux alors allez-y
379. Eni: **la famille de tout ce qui qui tombe**
380. Ens: ce qui tombe (écrit le nom des catégories au tableau)/ t'as mis quoi dedans↑
381. Eni: on a mis **la grêle**
382. Ens: la grêle
383. Eni: **la pluie et la rosée**
384. Elg: et la neige aussi
385. Ens: alors mettez-vous d'accord vite fait/ ce qui tombe grêle pluie neige/ grêle pluie rosée/ vous êtes pas d'accord↑/ dernière catégorie↑
386. Eni: **ben les mous**
387. Ens: les mous/ y a qui dans les mous
388. Eni: **ben la banquise le glacier le givre et la neige**

389. *Ens: d'accord (écrit au tableau)/ on continue on va voir les catégories des autres/ alors attention pour les autres groupes écoutez bien les autres groupes vous allez me nommer votre catégorie/ vous allez pas forcément dire tout ce qu'il y a dedans/ d'accord/ euh le groupe de Lorena↑*

Extrait A1 : propositions du premier groupe à intervenir lors de la mise en commun des différentes catégorisations des 20 photographies – S1 [(0:51:00) - (0:54:00)]

Analyse [méso/topo/chronogénèse]

Le système de classification des 20 photographies proposé par le groupe d'Enis fournit les principaux éléments de la mésogénèse (en gras, dans l'extrait).

Cinq catégories ont été mises en évidences dans le groupe d'Enis (Tours de Paroles - TdP 356, 357) : « la vapeur » (TdP 355), « les durs » (TdP 363), « le liquide » (TdP 375), « tout ce qui tombe » (TdP 379) et « les mous » (TdP 386). Pour chaque catégorie, Enis énumère les phénomènes / objets qui la composent :

- La catégorie « vapeur » contient les objets / phénomènes suivants : la brume, le brouillard, la vapeur d'eau, la buée, les nuages (TdP 361).
- La catégorie « les durs » englobe les objets / phénomènes suivants : l'iceberg, les cristaux de glace, les glaçons, la gelée blanche, le verglas (TdP 365, 367, 369, 371, 373).
- La catégorie « les liquides » inclut : la rivière, la mer et le lac. (TdP 377).
- La catégorie de « ce qui tombe » comporte : la grêle, la pluie et la rosée. (TdP 381, 383).
- La catégorie « les mous » contient les objets / phénomènes suivants : la banquise, le glacier, le givre et la neige. (TdP 388).

L'enseignante accueille sans jugement les propositions du groupe d'Enis (TdP 358, 364, 376, 380, 387, 389). Elle favorise l'expression des élèves en acceptant de manière bienveillante leurs réponses (« Ok », TdP 358 ; « d'accord », TdP 376) : elle se place ainsi dans une posture d'accompagnement. De plus, elle diffuse à la vue de tous la catégorisation du groupe en notant au tableau les catégories qu'Enis énumère (TdP 360, 376, 380). Cependant, elle ne reporte pas les différents membres que chaque catégorie contient et ne demande pas aux élèves de justification. La posture topogénétique de l'enseignante est basse dans cet extrait, au profit du développement des idées du groupe d'Enis. Au final, leur classification n'est ni confirmée ni invalidée : elle reste en suspens, puisqu'Amélie ne statue pas sur sa pertinence. La chronogénèse stagne dans cette partie.

En toute fin d'extrait, Amélie modifie la consigne : les élèves doivent maintenant se limiter à donner le nom des catégories, sans énoncer les phénomènes/objets qu'elles englobent (TdP 389). Elle ferme le (futur) milieu en déclarant par avance comme non-pertinents la liste des objets / phénomènes représentés sur les photographies : seules les catégories elles-mêmes ont de l'importance. Au niveau chronogénétique, cet apport dans le milieu entraîne un ré-orientation du cours de l'action sur lequel nous reviendrons dans la synthèse.

Analyse rapide du recueil des catégorisations des autres groupes

Par manque de place, nous ne pouvons analyser les extraits correspondants au recueil des catégorisations de chacun des autres groupes, qu'Amélie effectue pourtant, chaque groupe après

l'autre. Néanmoins, nous en donnons dans la suite quelques éléments significatifs, notamment au niveau mésogénétique, puisque la gestion chronogénétique et topogénétique de l'enseignante se maintient similaire à l'extrait précédent, excepté le fait qu'Amélie refuse désormais de considérer les phénomènes / objets que contient chaque catégorie dégagée. Mais, de notre point de vue, les traces recueillies des élèves nous permettent parfois de remonter aux phénomènes / objets de chaque catégorie et nous les ajoutons entre parenthèses le cas échéant.

Au niveau mésogénétique, les objets introduits dans le milieu sont axés sur les systèmes de classification des 20 photographies des différents groupes :

- Dans le groupe de Jodie, il existe quatre catégories : l'eau liquide (buée, rosée, mer, pluie, rivière, lac) ; les espèces de neige (neige, banquise, iceberg, gelée blanche) ; la glace (glaçons, cristal de glace, grêle, glacier, givre, verglas) ; la vapeur (brouillard, brume, nuage, vapeur d'eau).
- Dans le groupe de Marina, trois catégories sont dégagées : évaporisé renommée évaporé avec l'aide de l'enseignante (nuages, vapeur, brume brouillard, buée) ; liquide (givre, pluie, rosée, lac, mer) ; glacier/dur (gelée blanche, grêle, verglas, cristal de glace, etc.)
- Dans le groupe de Lorena, au moins cinq catégories émergent : les choses du matin ; les choses froides ; les choses transparentes ; la pluie et la grêle, catégorie renommée météo avec l'aide de l'enseignante ; les choses liées à la montagne.
- Dans le groupe de Tobin, quatre catégories sont mises en avant : glacé ; liquide ; fantôme ; ni dur ni mou.

Comme l'enseignante l'a précisé, les élèves n'ont donné que les dénominations des catégorisations, et contrairement à ce qui était annoncé au début, les critères de tri (comment les élèves ont reconnu que tel ou tel objet appartient à la catégorie « liquide » ou à la catégorie « fantôme ») n'ont pas été partagés en collectif. À la fin, toutes ces catégorisations sont notées au tableau, sans, qu'à aucun moment, Amélie n'ait statué sur leur validité. La chronogenèse est suspendue et l'enseignante est en retrait depuis le début de la mise en commun. C'est à ce moment-là que démarre l'extrait suivant.

Extrait A2 : introduction par l'enseignante de la catégorisation privilégiée (solide, liquide, gaz)

454. *Ens : alors vous voyez qu'en partant des mêmes images on peut obtenir plein de manières de les classer ou de les ranger/ ça va dépendre des critères que vous allez choisir/ du point commun que vous allez sélectionner pour pouvoir les différencier ou les rassembler/ d'accord↑/ et là au niveau scientifique nous on va essayer de tomber d'accord tous ensemble sur trois catégories qui sont liées à l'état de l'eau/ je vais préciser ma pensée/ on va d'abord regarder les points communs/ y a des mots qui reviennent/ presque tous les groupes ont eu ce moment où ils ont eu envie de mettre un groupe de mots d'images/ de choses qui sont liquides/ de l'eau liquide (entoure le mot liquide dans les catégorisations)/ ensuite on a eu une deuxième catégorie qui revient quand même assez souvent c'est dur/ glace/ glacé ou dur/ glace (entoure ces mots au tableau)/ ça ça revient dans beaucoup de groupes/ et y a encore une chose qui revient assez souvent qui revient pas partout mais qui revient assez souvent/ c'est quelle catégorie↑*

455. Els: les vapeurs/ les vapeurs

456. Ens: vapeur/ évaporé/ fantôme/ vapeur/ évaporée (entoure ces mots en même temps qu'elle les énonce)transparent ça encore faudrait voir/ ces trois mots ou types de catégories de critères/ vous les avez/ vous les avez ressortis dans presque tous les groupes/ en fait nous on va s'intéresser à comment est l'eau et on va la ranger ensemble comme ça// la famille liquide/ l'état liquide c'est l'état qu'on connaît le mieux de l'eau/ c'est l'état de l'eau qui sort du robinet / l'état liquide on va le garder c'est celui qui est commun à vous tous (écrit liquide sur un tableau à trois colonnes)/c'est celui qui est le plus évident/ si je vous dis eau vous pensez d'abord à quelque chose de liquide/ et puis on a vu avec ces images là que l'eau elle pouvait se cacher sous différentes formes/ comment est-ce qu'on pourrait appeler cet état où c'est dur glacé ou dur ou glace↑/ comment on appelle quelque chose qui n'est pas liquide mais qui est dur comme ça ↑ (tapote la table)/ est-ce qu'il y a un mot qui permettrait de dire qui ne serait pas le nom d'une de ces formes↑/ oui↑

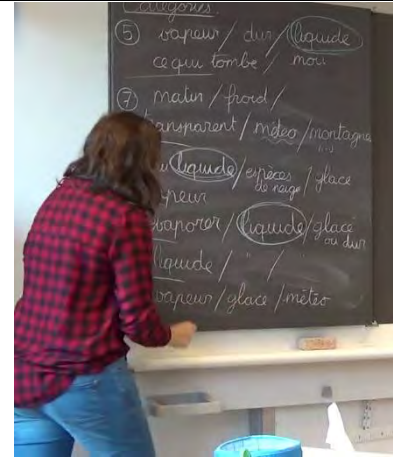


Figure 16 : Amélie entoure les dénominations communes

457. El: rigide

458. Ens: rigide ↓

459. El: glaçon

460. Ens : glaçon mais là glaçon c'est un truc en particulier/ hum la glace/

461. El : gelé

462. Ens : gelé↓

463. El : givré

464. Ens : givré↓

465. El : béton

466. Ens: ah tiens tu mets béton dans les catégories de ce qui est dur mais c'est intéressant parce qu'il n'y a pas que l'eau qu'on peut ranger comme ça selon son état/ d'accord/ y a des choses qui sont liquides et puis y a des choses quand elles sont pas liquides/ on dit comment↑/ on dit qu'elles sont comment↑

467. El: (xxx)

468. Ens: dernière chance Enis

469. Eni: je l'avais

470. Ens: ah tu l'as plus/ Kevin// on va dire que c'est solide (écrit solide sur la tableau à trois colonnes) d'accord↑/ et puis on va trouver l'eau dans la nature sous une dernière forme c'est cette forme que vous vous avez appelé vapeur/ vapeur/ évaporé/ même fantôme/ ce truc qu'on voit pas c'était l'image blanche là/ la forme qu'on ne voit pas et attention c'est là aussi où on va se où vous allez être surpris/ elle peut être sous forme de gaz (écrit gaz dans le tableau à trois colonnes)/ (aparté sur l'eau gazeuse)/d'accord/ donc en réalité on connaît trois états de l'eau l'état liquide/ l'état solide et l'état gaz/ d'accord/ c'est les trois formes où on peut trouver l'eau autour de nous et puis maintenant y a des fois c'est évident et des fois c'est un petit peu moins évident de savoir dans quelle famille ranger ça

Extrait A2 : introduction par l'enseignante de la catégorisation privilégiée (solide, liquide, gaz) – S1 [(1:01:00) - (1:06:00)]

Analyse [méso/topo/chronogène]

Amélie commence par apporter dans le milieu les objets suivants : 1) il existe plusieurs manières de classier les images, selon la classification qui est privilégiée (TdP 454) ; 2) au niveau scientifique, la classification favorisée concerne l'état de l'eau (TdP 454).

À partir de là, elle travaille les éléments déjà-là du milieu en procédant autoritairement à des recoupements entre les catégories apportées par les élèves afin d'aboutir à la classification privilégiée des états de l'eau. Elle désigne les traits pertinents suivants :

- la catégorie « liquide » a été reconnue par la plupart des groupes (TdP 456 ; Figure 16). De plus, il s'agit de l'état « qu'on connaît le mieux », à travers l'eau du robinet notamment (TdP 456) ;

- une autre catégorie coïncide avec ce que les élèves ont dénommé « dur », « glace » ou « glacé » (TdP 456, TdP 470). Certains élèves effectuent quelques apports dans le milieu en proposant à la demande de l'enseignante des dénominations pour cette catégorie : rigide (TdP 457), glaçon (TdP 459), gelé (TdP 461), givré (TdP 463), béton (TdP 465). Ces dénominations sont rapidement balayées par l'enseignante qui amène et impose, de manière surplombante, le terme « solide » (TdP 470) ;
- une dernière catégorie correspond à celle que les élèves ont appelé « vapeur », « évaporé », « fantôme » ou « transparent ». Toutes ces catégories sont censées relever du même état de l'eau, qu'elle dénomme elle-même « gaz » (TdP 470).

En parallèle, elle dresse un tableau à trois colonnes dont elle remplit progressivement les titres des colonnes : liquide, solide, gaz. Il existe donc trois catégories qui décrivent l'état de l'eau.

Dans cet extrait, c'est Amélie qui prend intégralement en charge le travail de transformation et d'évolution du milieu dans une posture de surplomb topogénétique. On peut néanmoins se demander si ce surplomb est atténué par le fait qu'elle travaille sur une matière première constituée des catégorisations amenées par les groupes d'élèves, qui apparaissent dans les extraits précédents au cours desquels l'enseignante effectuait leur mise en commun, dans une position d'accompagnement. C'est, d'une certaine manière, ce qu'Amélie laisse entendre quand elle défend le processus d'émergence de la « bonne » catégorisation comme « démocratique » (c'est à dire s'appuyant sur les éléments communs des différentes catégorisations des groupes d'élèves ; TdP 454). Nous laissons cette question du topos de l'enseignante en suspens pour y revenir dans la synthèse ci-dessous.

Au niveau chronogénétique, de par son statut d'enseignante, tous les objets qu'apporte Amélie dans le milieu sont, au minimum reconnus comme valides et au maximum institutionnalisés. L'avancée des savoirs la plus évidente concerne le nom des états de l'eau : solide, liquide, gaz.

Interprétation et synthèse de la première phase analysée (N13c)

Nous commençons par analyser la nature des catégorisations imaginées par les élèves.

Remarquons d'abord leur hétérogénéité : les critères de tri se rapportent au comportement de l'eau (« les choses qui tombent »), à son apparence (« les choses transparentes »), à ses propriétés (« les choses froides »), aux conditions dans lesquelles elle apparaît (« météo », « montagne », « les choses du matin »), à son état (« liquide », « ni dur ni mou »), etc. Il existe des groupes qui ont classé uniquement selon le critère de l'état de l'eau (groupe de Marina, de Tobin, de Jodie) et d'autres qui ont mélangé plusieurs critères (groupe d'Enis, de Lorena). Dans ce dernier cas, les catégories peuvent ne pas être mutuellement exclusives et une photographie est susceptible d'appartenir à plusieurs catégories (il faudrait alors plusieurs versions de la même photographie pour la ranger correctement). C'est d'ailleurs le dilemme qui se pose à la fin de l'Extrait A1 lorsqu'un élève du groupe d'Enis défend l'idée que la neige se situe dans la famille de « ce qui tombe » et non pas dans la famille « les mous », où ils avaient choisi initialement de la placer.

En ce qui concerne le critère de tri lié à l'état de l'eau, plusieurs remarques peuvent être établies :

- Le terme « liquide » est présent dans la majorité des groupes et les phénomènes / objets qui y sont associés rejoignent ceux que les scientifiques placeraient dans cette catégorie (sans que la catégorisation soit exhaustive, nous y revenons plus bas). Nous avons déjà remarqué (cf. 6.2) que l'eau à l'état liquide est une zone de recouvrement (partiel) entre langage scientifique et langage de la vie quotidienne, ce qui explique cette convergence.
- Le terme « gaz » n'apparaît pas dans les catégorisations des élèves. Par contre, certains phénomènes / objets sont souvent accolés ensemble dans une catégorie unique : la brume, le brouillard, les nuages, la vapeur d'eau et la buée. Cette catégorie est dénommée « vapeur » (groupe d'Enis, de Jodie), « évaporisé » (groupe de Marina) ou « fantôme » (groupe de Tobin). Cette volonté de juxtaposer ces objets (et du point de vue du scientifique, de les extraire à tort de la catégorie « liquide ») a été développée plus haut (cf. 6.2) : la brume, le brouillard, la buée, les nuages ne possèdent pas les propriétés classiques de l'eau liquide (incolore, nécessité d'un récipient pour la transporter, etc.) tout en partageant certaines caractéristiques avec les gaz (occupation d'un volume non délimité dans l'espace, par exemple).

C'est donc, de manière prévisible, un point de vue issu de la vie quotidienne sur les phénomènes / objets qui accompagne les élèves vers leur essai de catégorisation. Ces constats sont conformes avec ce que l'analyse a priori avait laissé prévoir.

Nous explorons à présent la dynamique de co-construction des savoirs lors de la mise en commun qui permet d'aboutir à la catégorisation privilégiée (solide, liquide, gaz).

Après le groupe d'Enis, Amélie modifie la consigne, de manière à ce que la contribution des différents groupes dans le milieu se limite à l'énonciation des catégories qu'ils ont imaginées. Cette orientation de l'action est cohérente avec les enjeux de la tâche : classer les phénomènes / objets liés à l'eau n'est qu'un moyen pour parvenir aux états de la matière et non une fin en soi. Cette réduction du milieu permet d'éviter à Amélie de traiter le foisonnement des objets qui peuvent potentiellement apparaître. On peut imaginer que la contrainte temporelle incite également Amélie à proposer cette modification, contrainte temporelle dont elle se rend compte après le long recueil des idées du groupe d'Enis. Ce geste de régulation possède des implications sur la structuration du milieu. La discussion est nécessairement amputée de certaines composantes, telles que : les élèves ont-ils classé les mêmes phénomènes / objets dans une catégorie nommée identiquement, telles que « liquide » ou « vapeur d'eau » ? Au fond, sur quels critères se fondent ces catégorisations ? C'est l'ensemble des rapports aux objets « liquide », « vapeur », etc. qui ne peuvent plus exister dans le milieu et qui deviennent un angle mort du débat.

Puis, Amélie procède à une gestion des catégorisations proposées par les élèves, en tirant le fil des dénominateurs communs des catégorisations des différents groupes, ce qu'elle n'a aucun mal à faire pour la catégorie « liquide » mais qui s'avère beaucoup plus indirect pour les catégories « solide » et « gaz » qu'elle cherche à imposer. D'après elle, la catégorie « solide »

est subsumée par ce que les élèves ont dénommé « dur », « glace » ou « glacé » ; quant à la catégorie gaz, elle correspond à ce qu'ils ont appelé « vapeur », « évaporé » ou « transparent ». Cette manière d'introduire les catégories privilégiées dans le milieu possède des effets pernicious, d'abord parce qu'elle relie de force des manières différentes de classifier : les groupes d'élèves n'ont pas placé les mêmes objets / phénomènes dans la catégorie « glacé », par exemple, en dépit de la similarité de la dénomination. D'autre part, la catégorie « gaz » ne contient, du point de vue scientifique, qu'un seul élément (la vapeur d'eau). Or, les catégories « vapeur », « évaporisé » des groupes d'élèves en contiennent plusieurs, dont la plupart sont liquides : il n'est donc pas possible de superposer l'état gazeux de l'eau avec les catégories « vapeur », « évaporisé », « transparent » ou « fantôme » des élèves. Cependant, en raison de l'interdiction de mentionner les éléments que contiennent les catégories, ces décalages ne peuvent pas se révéler dans le milieu.

Ces limites laissent penser que la manière dont Amélie procède pour établir une avancée des savoirs relève d'une illusion de s'appuyer sur les propositions des élèves et non d'une véritable prise en compte de leurs rapports aux objets « liquide » ou « gaz ». Au final, le geste banal d'enseignement qui consiste à choisir les éléments du milieu qui servent l'objectif visé s'accompagne, dans cette phase, d'une déformation ou d'une surinterprétation du sens que les élèves y ont placé (par effet Jourdain, dans le vocabulaire de Brousseau). Pour reprendre une interrogation précédente laissée en suspens, le topos de l'enseignant, lors de l'introduction de la catégorisation des états de la matière, est surplombant et provoque des discontinuités, voire des ambiguïtés du point de vue des élèves. En effet, certains d'entre eux voient leur catégorisation confortée, malgré les décalages qui existent entre leur classement et un classement scientifiques des 20 photographies. L'absence dans le milieu de critères qui servent à établir la définition des trois états implique que les élèves n'ont toujours pas d'autres ressources que leurs références premières pour situer un liquide, un solide ou un gaz.

7.4.2 Analyse des deuxième et troisième phases (N41c et N43a) : l'étude de l'ébullition

Contextualisation de l'Extrait A3

Après l'introduction de la catégorisation des états de l'eau, certaines propriétés de l'état liquide et des transitions liquide - solide ont été étudiées. Pendant cette étude, l'état gazeux n'a pas été mentionné. Amélie reprend son étude en demandant aux élèves de représenter et de décrire une expérience dans laquelle de l'eau liquide se transforme en eau sous forme gazeuse. Après que les élèves se soient essayés individuellement à cet exercice, Amélie recueille les idées d'expérience en collectif. C'est à ce moment que démarre l'extrait suivant.

Analyse a priori de la situation

Le déroulement de la tâche de catégorisation des objets / phénomènes liés à l'eau n'a pas permis de faire évoluer les rapports à l'objet « gaz » vers un point de vue scientifique et au contraire, a pu conforter certains élèves dans le bien-fondé de leur critère de reconnaissance de l'état gazeux de l'eau. Si les élèves restent sur leurs références premières pour distinguer la vapeur

d'eau et continuent de l'assimiler à la brume, au brouillard ou aux nuages, l'expérience de transition liquide-gaz qu'ils sont en mesure de proposer risque bien de faire apparaître de nouveau ces objets / phénomènes.

Le travail de gestion du milieu que l'enseignante va devoir accomplir est très important puisqu'elle va devoir faire évoluer en parallèle les rapports à plusieurs objets cruciaux : l'objet « vapeur d'eau », l'objet « état gazeux de l'eau », l'objet « eau liquide » et l'objet « changement de l'état liquide vers l'état gazeux de l'eau ».

Extrait A3 : Choix d'une expérience de transition eau liquide – eau sous forme de gaz

- 279.** *Ens: donnez-moi vos idées d'abord par rapport à comment je peux transformer mon eau en eau gaz/ ton idée↑*
- 280.** *Jod: ben moi je sais pas si c'est bien en fait/ mais on allume du feu et ça fait du gaz*
- 281.** *Ens: t'allumes du feu et ça fait du gaz/ t'as besoin de l'eau ou pas↑*
- 282.** *Jod: euh ben oui un peu/ parce que (xxx) et si on veut que ce soit un peu plus fort/un peu plus de feu (fait des gestes de fumée) tu mets un peu plus d'eau et ça enfin*
- 283.** *Ens: d'accord mais moi/ alors ce que t'es en train de dire c'est que le feu lui-même il fait du gaz c'est ça↑/ mais est-ce que c'est du gaz de l'eau↑*
- 284.** *Jod: ben oui on met un peu d'eau et*
- 285.** *Ens: quand tu la rajoutes encore par-dessus*
- 286.** *Jod: ouais et ça prend plus*
- 287.** *Ens: moi je voudrais être sûre que c'est cette eau là (désigne son gobelet) qui est en gaz/ je veux vraiment transformer mon eau du robinet là en gaz/ t'es pas loin mais il manque une précision quand même pour être sûr que ce soit l'eau que j'ai choisi que je voulais transformer en gaz/ moi je veux choisir/ je veux savoir laquelle d'eau je transforme en gaz*
- 288.** *Thi: (xxx) une décharge électrique*
- 289.** *Ens: une décharge électrique/ tu penses si je fais une décharge électrique sur mon verre d'eau ça peut me le transformer*
- 290.** *Thi: sur l'eau*
- 291.** *Ens: dans l'eau je mets des câbles dans l'eau c'est ça que t'as fait↑*
- 292.** *Thi: euh ouais*
- 293.** *Ens: ouais/ une décharge électrique dans l'eau et puis ça te ferait du gaz/ c'est une hypothèse c'est une idée d'expérience/ oui↑*
- 294.** *Tob: tu fais bouillir l'eau/tu mets dehors au chaud par exemple l'été quand il fait chaud et au bout d'un moment ben ça va faire évaporer*
- 295.** *Ens: ah toi tu dis que c'est la chaleur qui va faire transformer mon eau en gaz et qu'elle va/ t'as utilisé quel mot tu m'as dit↑/ t'as dit↑ elle va↑/vas-y*
- 296.** *Tob: elle va s'évaporer*
- 297.** *Ens: elle va s'évaporer tu m'as dit d'accord/ ok ok/(...) Chiara↑*
- 298.** *Chiara: ben il faut allumer la cuisinière*
- 299.** *Ens: chut on s'écoute*
- 300.** *Chiara: on met chaud/on met de l'eau dans une casserole/ on met l'eau sur la*
- 301.** *Ens: cuisinière*
- 302.** *Chiara: oui sur la cuisinière et on laisse un bout de temps/ ça va faire évaporer*
- 303.** *Ens: ça va faire évaporer mon eau/ c'est mon eau qui va devenir du gaz/ d'accord oui*
- 304.** *El: l'eau tu dois l'enfermer dans un truc très chaud*
- 305.** *Ens: mon eau elle doit être dans quelque chose de très chaud pour que ça marche/ c'est ça que tu dis/ oui*
- 306.** *Mar: en fait tu prends l'eau chaude/ et après tu vas dans une salle par exemple et après t'as de l'eau chaude qui commence à s'évaporer*
- 307.** *Ens: alors toi tu parles du sauna/ ou du hammam↑/ non c'est pas ça↑*
- 308.** *Mar: genre tu vas dans une salle/ et quand tu te douches si tu mets de l'eau chaude ben t'as de la vapeur*
- 309.** *Ens: ah tu fais chauffer de l'eau très très chaud et ça fait de la vapeur/ c'est ça que t'es en train de dire/ d'accord (...)/ok/ donc j'entends plusieurs choses/ j'ai entendu plusieurs fois le mot chaleur/ j'ai entendu plusieurs fois le mot évaporé/ hein j'ai entendu chaleur il faut chauffer l'eau/ évaporer/ d'accord après ça*

fait du gaz/ j'ai entendu le mot vapeur aussi/(...) d'accord/ je vais choisir une de vos expériences qui va être faisable en classe/ d'accord on va en prendre une pour vos expériences qu'on va faire la semaine prochaine une expérience dans ce qui a été proposé parce qu'effectivement vous avez remarqué chut/ ce qui a fait qu'on a pu transformer du liquide en solide ou du solide en liquide c'était un changement de température/ on a vu que en dessous de zéro degrés l'état change par rapport à en-dessous de zéro degrés et vous avez aussi conscience qu'il faut chauffer cette eau pour pouvoir lui faire changer son état donc on va être dans des températures plus élevées mais combien on sait pas/ d'accord/donc l'expérience qu'on va pouvoir faire la semaine prochaine c'est que je vais pouvoir amener (écrit)/// ça c'est une des possibles/ y a deux possibilités/ on va choisir entre les deux en fonction/ enfin je verrai avec le matériel que j'ai ici en classe/ une des possibilités si je pars avec une plaque électrique (...) donc/ avec ma bouilloire ou ma plaque électrique et ma casserole je vais pouvoir faire chauffer de l'eau/ la question qu'on va se poser la semaine prochaine/à quelle température/ quelle température (écrit)// mon eau// va t-elle// devenir gaz/ alors hypothèse à quelle température↑ (...)

310. El: septante

311. Ens : septante degrés

312. Kev: (xxx) soit il faut que la température soit très très basse/ ou une température très très haute

313. Ens: ah tu penses que ça s'évapore aussi quand c'est très très très froid/ tu penses aussi que si je mettais dans un congélateur ça finirait par s'évaporer dans très très froid/ mais laisse-lui expliquer c'est ses hypothèses à lui/ ça m'intéresse moi/ je suis contente que vous ayez pas tous le même avis/ vas-y// t'hésites/ je te laisse réfléchir un petit peu et puis tu me redis ce que t'en penses/ Marina↑

314. Mar: dix-sept

315. Ens: dix-sept degrés déjà/ à dix-sept degrés ça s'évapore/ oui

316. Day: ben oui Kevin a raison parce quand elle est froide t'as un truc qui sort

317. Ens: pardon↑

318. Day: y a un truc qui sort quand t'as de l'eau froide

319. Ens: quand t'as de l'eau froide là y a un truc qui sort↑/ c'est ça↑

320. Day: de la fumée

321. Ens : ah quand l'eau est très très froide/ d'accord/ on discutera de pourquoi il y a ça/ ouais ouais ok je vois de quoi vous voulez parler/ ok

Extrait A3 : Choix d'une expérience de transition eau liquide – eau sous forme de gaz – S3 [(1:03:00) - (1:10:00)]

Analyse [méso/topo/chronogène]

La référence commune est principalement nourrie des idées d'expériences des élèves afin de provoquer le changement d'état de l'eau liquide en eau sous forme de gaz :

- D'après Jodie, il faut allumer « un feu », ce qui produit « du gaz » (TdP 280).
- D'après Thibault, il suffit de mettre des câbles électriques dans l'eau afin de provoquer une « décharge électrique » (TdP 288-293).
- D'après Tobin, il faut placer l'eau dans un endroit chaud l'été, ce qui va la faire « bouillir » et « évaporer » (TdP 294).
- D'après Chiara, on peut « chauffer une casserole d'eau sur la cuisinière », ce qui permet de la faire « s'évaporer » (TdP 298, 300, 302).
- D'après Marina, « l'eau chaude s'évapore » et crée de « la vapeur » lorsque l'on est sous la douche dans la salle de bains (TdP 306, 308).

Dans un premier temps, Amélie recueille les différents protocoles des élèves depuis une posture topogénétique basse d'accompagnement. Elle ne travaille pas sur ces objets et se contente de les juxtaposer dans le milieu. Puis, lorsque ce recueil touche à sa fin, elle prend une position davantage surplombante et resserre le milieu autour de certains traits pertinents :

- La plupart des protocoles proposés par les élèves font appel à la chaleur pour imaginer la transformation demandée (TdP 309).

- Un changement de température est donc déterminant pour déclencher la transition entre l'eau liquide et l'eau sous forme de gaz (TdP 309). C'est d'ailleurs de cette manière qu'a eu lieu le changement entre l'état liquide et l'état solide de l'eau, étudié lors des séances précédentes (TdP 309).
- Une des expériences proposées sera choisie pour être mise en place la semaine suivante, à condition qu'elle soit faisable en classe (TdP 309). Il est probable que cette expérience fasse intervenir une bouilloire ou une plaque électrique (TdP 309).

Tout comme l'extrait précédent, il est possible de se demander si le surplomb dont elle fait preuve à ce moment-là est atténué par le fait qu'elle opère sur une matière première constituée des idées d'expériences que les élèves viennent de développer dans le milieu. C'est ce qu'Amélie laisse entendre quand elle suggère que la chaleur est le dénominateur commun de l'ensemble des propositions d'élèves et que son apport dans le milieu n'est que le prolongement d'une idée prédominante. Nous laissons cette question du topos de l'enseignante en suspens pour y revenir dans la synthèse ci-dessous. Au niveau chronogénétique, l'avancée des savoirs réside principalement dans la validation des paramètres « chaleur » et « changement de température » pour provoquer le changement d'état désiré et sur l'anticipation de l'expérience d'ébullition.

Un dernier objet significatif émerge du milieu : en prenant le contre-pied de ce que l'enseignante vient de développer, Kevin assure qu'une température très froide produit également de l'eau sous forme de gaz (TdP 312). Dayanna surenchérit en attestant que, dans ce cas, on observe bien de la fumée qui s'échappe de l'eau froide (TdP 316, 318, 320). Dans une posture d'accompagnement, Amélie admet les phénomènes évoqués, sans se prononcer sur le bien-fondé de cette proposition contradictoire avec son discours ni sur la nature de ce qui s'échappe de l'eau froide (TdP 321).

Interprétation de l'Extrait A3

Nous commençons par analyser la nature des protocoles imaginés par les élèves. Nous pouvons classer les rapports à l'objet « changement d'état liquide - gaz » des élèves en fonction des critères qu'ils se donnent pour reconnaître la présence de l'état gazeux (qui restent implicites).

- Aucun propos de Jodie ne laisse penser qu'elle se situe au-delà d'une vision naïve de l'état gazeux : en particulier, il est possible d'affirmer que, selon elle, la fumée, créée par le feu qu'elle préconise d'allumer, est synonyme de gaz.
- Thibault envisage de provoquer une décharge électrique dans l'eau. Il est difficile de remonter à la rationalité de cette proposition : il faudrait cartographier l'ensemble des rapports à l'objet « décharge électrique » déjà établi par cet élève. Peut-être que, selon lui, les décharges électriques sont associées aux surchauffes de circuit électrique ou à la foudre, ce qui peut entraîner brûlure, départ de feu ou fumée. Dans ce cas, l'état gazeux serait signifié par la présence de fumée, comme pour Jodie.

- Tobin et Chiara suggèrent de placer l'eau dans un endroit chaud (au soleil ou sur la cuisinière). Ces deux élèves font correspondre les termes « évaporer » et « bouillir » à cette situation.
- Marina évoque la vapeur d'eau créée par l'eau chaude dans la salle de bains. Il est probable qu'elle se réfère à la brume ou à la buée qui apparaissent dans ces circonstances et qui signifient, selon elle, la présence de l'eau à l'état gazeux.
- Kevin et Dayanna affirment qu'il est possible qu'une température extrêmement froide produise également de la « fumée » (qui correspondrait à de l'eau sous l'état gazeux, selon eux). Ces élèves font peut-être référence au brouillard qui apparaît lorsque de l'eau liquide chaude est introduite dans une atmosphère très froide (par exemple, une tasse de thé amenée à l'extérieur l'hiver). Il est également possible qu'ils évoquent les volutes blanches qui deviennent visibles lors de la manipulation de l'azote liquide à très basse température : l'azote liquide est utilisé dans certaines circonstances potentiellement familières aux élèves, comme pour le traitement de petites lésions dermatologiques. Ces volutes blanches proviennent de la condensation en fines gouttelettes de l'humidité atmosphérique au contact de l'azote gazeux froid qui se dégage dans cette situation.

Dans le cas de Marina, Kevin et Dayanna, ce sont des situations de condensation, c'est-à-dire des transitions de l'état gazeux de l'eau (vapeur invisible) vers l'état liquide qui sont l'objet du discours des élèves.

En résumé, les critères que la plupart des élèves se donnent selon nous pour répondre à la demande de l'enseignante témoignent d'une vision du rapport à l'objet « gaz » et l'objet « état gazeux de l'eau » issue de la vie quotidienne : pour Jodie (et peut-être Thibault), le gaz est assimilé à la fumée. Pour Marina, Kevin et Dayanna, la brume, la buée signifient l'état gazeux de l'eau : d'un point de vue scientifique, ces élèves proposent une expérience de changement d'état inverse de celle demandée (c'est-à-dire de condensation au lieu de vaporisation). Soulignons que Dayanna appelle également la brume « fumée ». Nous avons discuté des raisons qui sous-tendent ces éléments de décalage avec l'explication scientifique dans l'analyse des obstacles épistémologiques (cf. 6.2). Ce décalage a été renforcé par le traitement de l'objet « état gazeux de l'eau » dans la tâche de classification des 20 photographies.

Nous explorons à présent la dynamique de co-construction des savoirs qui permet d'aboutir à l'expérience de changement d'état liquide-gaz qui va être choisie pour être mise en place la semaine d'après (l'expérience d'ébullition de l'eau à l'aide d'une bouilloire électrique). Pour amener dans le milieu cette expérience, le principal argument d'Amélie consiste à valoriser une caractéristique présente dans la plupart des propositions des élèves : les expériences envisagées font souvent intervenir une augmentation de température et/ou une présence de chaleur. Amélie compte sur la récurrence de ce dénominateur commun pour asseoir le bien-fondé de l'expérience qu'elle promeut. Cependant, de façon très similaire à l'extrait précédent, cette évolution du milieu ressemble davantage à un tour de passe-passe rhétorique qu'à une réelle prise en compte des rapports aux objets des élèves : Jodie évoque bien la chaleur mais il s'agit de celle du feu qu'elle envisage d'allumer, feu qui produit de la fumée qu'elle assimile à du gaz

! Marina évoque également l'eau chaude de la salle de bains mais ce sont les volutes blanches de brume produites dans cette pièce (de l'eau liquide, donc) qu'elle associe à de la vapeur d'eau. En d'autres termes, ce n'est pas parce que les élèves ont amené l'idée de chaleur qu'ils maîtrisent les savoirs liés à la reconnaissance de la vapeur d'eau. La convergence entre ces propositions d'élèves et les conditions nécessaires au changement d'état eau liquide / vapeur d'eau ne peut apparaître que fortuite. Or, l'enseignant se base sur cet élément contingent du milieu (le fait que les élèves ont souvent évoqué la chaleur) pour introduire l'expérience dont elle (et elle seule) sait qu'elle permet effectivement le changement d'état désiré. Ce geste s'accompagne d'une déformation du sens que les élèves accordent à certains objets du milieu : la vapeur d'eau, le gaz ou la chaleur.

D'autre part, du point de vue des élèves, ce geste est susceptible de provoquer des ambiguïtés. En effet, malgré une incompatibilité fondamentale, Jodie, Marina et d'autres peuvent estimer favorablement la pertinence de leur proposition d'expérience par rapport à l'enjeu visé : ce risque est d'autant plus grand que l'enseignante affirme choisir « une de [leurs] expériences qui va être faisable en classe », sous-entendant ainsi que toutes les idées d'expériences sont satisfaisantes sur le plan conceptuel mais que seules quelques-unes sont réalisables à l'intérieur des contraintes de la classe (matériel, temps à disposition, etc.). Il s'avère difficile pour les élèves de situer leurs idées par rapport aux attentes de l'enseignante.

Enfin, l'expérience de changement d'état liquide-gaz choisie (la bouilloire électrique) exclue les idées des élèves qui apparaissent vers la fin de l'extrait et qui évoquent des conditions contraires : Kevin et Dayanna, qui pensent que de l'eau très froide dégage aussi de la vapeur d'eau, voient d'autorité leur idée écartée du champ des possibles, puisque l'enseignante ne reviendra pas sur ces propositions dans la suite de la séquence.

Ce passage d'une phase dialogique qui juxtapose les idées des élèves sans les négocier à une phase autoritative (avec une illusion de continuité purement rhétorique) paraît être une des constantes de la dynamique de progression des savoirs chez cette enseignante : nous discuterons de ses racines et de ses implications sur l'action conjointe plus bas.

Contextualisation de l'Extrait 4

Entre le moment où l'expérience d'ébullition a été imaginée (cf. Extrait A3 précédent) et celle où elle a été réalisée en classe (cf. Extrait A4 suivant), une courte étude de l'évaporation a été menée. Cette étude s'est basée sur des constatations établies à partir du comportement de l'eau dans trois contenants (bol, verre, bouteille fermée) à une semaine d'intervalle. En une semaine, l'eau du bol a totalement disparu ; le niveau de l'eau du verre a fortement diminué ; celui de l'eau de la bouteille fermée n'a quasiment pas changé et des gouttes d'eau sont apparues en haut de la bouteille.



Figure 17 : Expérience qui a servi de support à l'étude de l'évaporation

La modélisation du phénomène s'est limitée à l'affirmation que l'eau liquide s'est évaporée dans les deux premières situations.

Plusieurs élèves ont associé l'eau qui s'évapore à une sortie, une montée de l'eau à l'extérieur du contenant, sans pour autant l'assimiler à un changement d'état. Même si Tobin a introduit l'idée d'« eau sous forme de gaz » dans le milieu, Amélie n'a pas validé clairement que l'évaporation correspondait à la transformation de l'eau liquide en vapeur d'eau. De plus, n'ont pas été abordées les caractéristiques de l'état gazeux (par exemple, la déformabilité et la répartition dans tout le volume disponible) ; les caractéristiques spécifiques de la vapeur d'eau (invisibilité, présence constante dans l'atmosphère) ; les propriétés des transitions de phase de l'eau (conservation de la matière, maintien de l'identité de l'eau, réversibilité).

Certains paramètres du phénomène ont été explorés (rôle de l'air, de la chaleur, de la surface libre).

Puis, l'expérience de l'ébullition est menée : de l'eau est mise à chauffer dans une bouilloire. Plusieurs constats émergent : au début, des petites bulles remontent ; une « espèce de crépitement » se fait entendre ; des gouttes de buée apparaissent en haut de la bouilloire. C'est à ce moment-là que l'enseignante commence à interroger les élèves sur la vapeur d'eau et que démarre l'extrait suivant.

Extrait A4 : L'enseignante établit que l'eau sous forme de gaz est invisible

204.Ens: *mais je vois rien sortir/ vous me dites que y a de la vapeur/ que y a du gaz mais je le vois pas/ c'est un/ pardon*↑

205.Dav: *c'est normal/c'est invisible*

206.Ens: *invisible/ le gaz c'est invisible*↑

207.Els : *non/non*

208.Tob: *non/le nuage c'est un gaz mais on le voit*

209.Ens: *le nuage c'est un gaz mais on le voit// y a deux avis qui s'affrontent hein/ c'est deux hypothèses hein/ le gaz c'est sous forme de nuage donc ça va se voir/ ou bien non le gaz il est invisible/ y a deux choses-là qui sont dites hein/ (...) est-ce que maintenant là [voir Figure 18] vous pensez que c'est déjà*↑/ *y a déjà de l'eau qui s'évapore en ce moment-là*↑

210.Els: *oui/non/bientôt*

211.Ens: *bientôt/ là pour l'instant ça s'évapore pas*↑

212.Dav: *là c'est la buée*

213.Ens: *on va faire autrement/ qui pense que là l'eau elle est déjà en train de s'évaporer*↑/ *levez la main*↑ (*huit mains se lèvent*)/ *qui pense que l'eau /elle a pas encore commencé qu'il faut attendre encore un petit peu*↑ (*deux mains visibles à la caméra*)/ *Marina et les autres hein donc (xxx)/là ok (deux autres doigts se lèvent)/ donc à peu près y a quand même plus de gens qui pensent qu'elle est déjà en train de s'évaporer/ mais un peu plus de la moitié /et puis y a un petit tiers de la classe qui pense que non non il faut attendre/ tu vas attendre quoi toi* Enis *pour être sûr que ça s'évapore*↑

214.Enis: *ben que/ ben qu'il y ait*

215.Ens: *c'est en train d'arriver là (désigne les remous de l'eau dans la bouilloire)[voir Figure 19] /comment ça s'appelle là*↑

216.El: *y a des bulles là*

217.Ens: *ces grosses bulles là quand mon eau elle fait des grosses bulles/on appelle ça comment*↑

218.El: *ça bouille*

219.Ens: *pardon*↑

220.El: *ça bouille*

221.Ens: *ça bouille/ ça bout ouais ça bouille/ on appelle ça l'ébullition hein/ ça y est elle bout/ et alors*↑ (*des volutes blanches s'échappent de la bouilloire*)

222.El: *y a de la fumée*

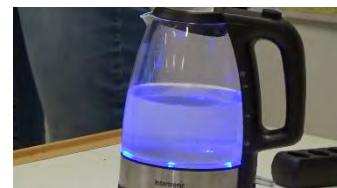


Figure 18 : L'état de l'eau au TdP 209 avant ébullition



Figure 19 : L'état de l'eau au TdP 215 pendant l'ébullition

223.Ens: ah là↑/ quand y a l'ébullition vous voyez un nuage de/ de fumée qui sort/ donc c'est ça en fait le gaz/ ça là↑ (désigne les volutes blanches qui s'échappent de la bouilloire)[voir Figure 20]

224.Els : oui

225.El: c'est de la vapeur/ c'est du gaz

226.Ens: c'est de la vapeur et du gaz/ ok/ (...) y en a une partie d'entre vous qui m'ont dit il faut attendre// l'ébullition (écrit)// il faut attendre/ pardon/ l'ébullition pour que l'eau elle soit sous forme de gaz/ pour qu'il y ait la vapeur d'eau sous forme de gaz// hum/ faut attendre que ça bout/ avant ça y a pas d'évaporation/ y en a d'autres qui m'ont dit non non non l'évaporation ça commence avant dès le début/dès que je commence à chauffer/ mais alors du coup moi je me pose une question/ l'eau qu'on a mis au bord de la fenêtre là (désigne les contenants qui ont servi à établir l'évaporation dans l'activité précédente)[voir Figure 17] / est-ce que vous êtes d'accord de dire qu'elle s'est évaporée à un moment donné↑

227.Els: oui

228.Ens: est-ce que elle est/ est-ce que à un moment donné vous pensez qu'elle est entrée en ébullition↑/ est-ce qu'elle a bouilli↑

229.El: oui

230.Elf: non enfin un peu

231.Ens: vous pensez que là si je mets l'eau ici et que je la laisse longtemps elle va bouillir et que c'est pour ça qu'elle s'est évaporée↑

232.Els: non

233.Ens: est-ce que c'est possible que mon eau elle s'évapore sans bouillir↑

234.Els: oui

235.Ens: alors qui pense que c'est possible que mon eau elle s'évapore sans bouillir↑/ on lève la main/ que j'ai pas besoin que ça bout pour que ça s'évapore↑ (huit doigts visibles)// Enis toi tu penses quand même que du coup elle a eu besoin de bouillir là là et là ↑ (désigne les contenants qui ont servi à établir l'évaporation dans l'activité précédente)/ là mon eau si je mets mon doigt dedans/ si je mets mon thermomètre c'est mieux que mon doigt (mesure la température)/ si je mets mon thermomètre dedans elle est à vingt/ dix-neuf/ dix-neuf degrés/ dix-neuf virgule deux/ mais pourtant elle s'est évaporée quand même↓/ et elle n'est pas en train de bouillir/ on est d'accord↓/ est-ce qu'on voit un nuage de vapeur↑

236.Els : non

237.Ens : non/ ici/ ici elle s'est aussi évaporée/ elle a bouilli/ mais est-ce qu'elle avait pas déjà commencé à s'évaporer avant de bouillir/ elle avait déjà commencé avant↓/ merci beaucoup (à Lorena qui lui donne ce qu'elle lui a demandé)/ elle avait déjà commencé à bouillir avant↓/ à s'évaporer avant↓/ donc y a deux choses différentes/ et ça vous devez bien écouter/ l'eau sous forme de gaz/ elle est effectivement invisible↓/ je ne la vois pas/ je vois pas quand mon lac il s'évapore↓/ je vois pas quand l'eau de ma soucoupe elle s'évapore/ je vois pas cette eau qui est en train de se transformer en gaz/ par contre quand je chauffe très très fort j'ai remarqué que mon eau elle finit par bouillir/ elle entre en ébullition/ cette température où elle entre en ébullition/ c'est cent degrés (écrit)/ à cent degrés il faut monter très haut/ là (désigne les trois contenants) elle est à vingt/ à cent degrés elle va entrer en ébullition et à cent degrés on va voir un espèce de petit nuage au-dessus/ d'accord↑/ mais ce nuage qu'on voit avec ce qu'on va étudier maintenant on va réfléchir de savoir est-ce qu'il est fait de gaz ou pas↓/ d'accord/ pour l'instant ce qu'on sait↓/ c'est que mon eau elle a pas forcément besoin de bouillir/ elle a besoin d'air et de chaleur pour s'évaporer/ et on sait aussi que si je chauffe chauffe chauffe jusqu'à cent degrés elle va se mettre à bouillir et qu'on va voir comme un nuage apparaître/ c'est tout pour l'instant ce qu'on sait/

Extrait A4 : L'enseignante établit que l'eau sous forme de gaz est invisible - S4 [(32:00) - (45:00)]



Figure 20 : Amélie désigne les volutes blanches qui s'échappent de la bouilloire

Analyse [méso/topo/chronogénèse]

La mésogénèse se construit conjointement au déroulement de l'expérience d'ébullition. Elle concerne principalement les objets que désigne l'enseignante, objets physiques tels que les bulles, les volutes blanches de brume qui s'échappent de la bouilloire ou objets conceptuels tel que la vapeur d'eau.

Tout au long de l'extrait, dans une posture surplombante, Amélie désigne certains traits pertinents relatifs à l'ébullition : elle désigne le moment du début de l'ébullition (TdP 215), qualifie le phénomène (« ébullition », TdP 221 ; « bouillir », TdP 221, etc.) et lui associe des

éléments de définition : présence de « grosses bulles » (TdP 217) et « d'un nuage de fumée » qui s'échappe de la bouilloire (TdP 223). Plus tard, elle fait également entrer dans le milieu l'idée que l'eau démarre son ébullition autour de 100°C (TdP 237).

Parallèlement, elle met en scène l'incompatibilité des points de vue à propos de la vapeur d'eau (TdP 204-209). David et Tobin s'opposent quant à la perceptibilité de la vapeur d'eau : selon David, elle est « invisible » (TdP 205) tandis que Tobin argumente le contraire en faisant valoir l'idée que les nuages sont gazeux **et** visibles (TdP 208). Comme Tobin, lors de l'ébullition, plusieurs élèves soutiennent que les volutes blanches qui s'échappent de la bouilloire lors de l'ébullition constituent de « la vapeur » ou « du gaz » (TdP 224-225). Ce débat est laissé en suspens jusqu'à la toute fin de l'extrait (TdP 237).

Amélie organise ensuite un vote à main levée : à un moment de l'expérience où l'eau de la bouilloire n'est pas encore rentrée en ébullition (cf. Figure 5), elle demande aux élèves de se prononcer. L'évaporation a-t-elle déjà commencé ou non ? Elle fait le bilan comptable : un peu plus de la moitié de la classe estime que l'eau commence à s'évaporer à ce stade (avant ébullition), un tiers estiment que ce n'est pas le cas (TdP 213).

Le débat relatif à la perceptibilité de la vapeur d'eau est enfin repris par l'enseignante, qui développe un long raisonnement dans une posture surplombante (TdP 237). Amélie commence par faire appel à la mémoire didactique en ré-orientant drastiquement la discussion sur l'expérience qui a servi de support à l'étude de l'évaporation et qui faisait intervenir des constatations sur le niveau de l'eau dans trois contenants (bol, verre, bouteille fermée) sur une semaine d'intervalle. Cette étude venant de se terminer, les trois contenants sont toujours à la même place, au bord de la fenêtre (cf. Figure 17, p. 172). Elle pointe alors les traits pertinents suivants :

- L'eau des contenants utilisés précédemment (le bol, le verre) s'est évaporée sans bouillir. Elle corrobore cette affirmation à l'aide d'une mesure de température de l'eau du verre (19, 2°C) au TdP 235 et d'un vote à main levée (TdP 235).
- D'autre part, on ne voit pas de « nuage de vapeur » se dégager de ces contenants (TdP 235-237).
- L'eau de la bouilloire avait déjà commencé à s'évaporer avant de bouillir (TdP 237).
- L'eau sous forme de gaz est donc invisible (TdP 237).

La balance topogénétique penche nettement vers l'enseignante, qui prend en charge l'entièreté de l'interprétation de l'expérience d'ébullition et de l'argumentation qui mène à la conclusion de l'invisibilité de l'eau sous forme de gaz. Les questions qu'elle pose aux élèves ou les votes auxquels elle les soumet ne leur permettent aucune marge de manœuvre, pour discuter de leurs rapports aux objets du milieu. Les élèves participent donc a minima dans la construction des savoirs de cet extrait.

Au niveau chronogénétique, la progression des savoirs est rapide : l'institutionnalisation que propose l'enseignante à la fin statue clairement sur plusieurs points conceptuels essentiels liés

aux états de l'eau, en particulier l'imperceptibilité de la vapeur d'eau et certaines propriétés relatives au phénomène d'ébullition.

Interprétation de l'Extrait A4

Du point de vue de l'enseignante, il s'agit principalement, dans cet extrait, d'établir que l'eau sous forme de gaz est invisible et de contribuer à contredire l'idée que les volutes blanches nuageuses au-dessus de la bouilloire sont de la vapeur d'eau. Pour atteindre cet enjeu, elle construit une argumentation qu'elle déroule sans l'aide des élèves. Explorons la dynamique de cette construction, en la complétant si nécessaire avec des étapes non entièrement explicites dans le discours d'Amélie. Elle commence par établir que l'eau des contenants précédemment utilisés s'est évaporée sans passer par une phase d'ébullition. Elle appuie son propos en prenant la température de l'eau du verre : puisque l'ébullition se déroule aux alentours de 100°C et que l'eau du verre est d'environ 19°C, celle-ci ne passe pas par une phase d'ébullition avant de s'évaporer. De là, elle en déduit que l'eau de la bouilloire s'évapore également dès le début de l'expérience, bien avant de bouillir. Or, puisque les volutes blanches commencent à n'apparaître qu'à partir de l'ébullition, elles ne peuvent pas être de la vapeur d'eau : celle-ci, créée en permanence, est forcément invisible. Nous donnons les raisons pour lesquelles cet argument épistémique, qui aurait pu s'avérer intéressant dans le sens où il crée une continuité entre les conclusions des expériences d'évaporation et celles de l'expérience d'ébullition, reste peu accessible pour les élèves de la classe, d'une part, et a pour conséquence collatérale de brouiller la conceptualisation de l'ébullition, d'autre part.

- D'abord, la force de conviction de l'argumentation dépend de l'étude de l'évaporation menée précédemment. Or, nous l'avons souligné plus haut, lors de cette étude, Amélie n'a pas validé clairement que l'évaporation correspondait à la transformation de l'eau liquide en vapeur d'eau. La possibilité d'existence de quelque chose appelé « vapeur d'eau », ainsi que sa nature et ses propriétés représentent des angles morts de la référence partagée.
- Ensuite, l'argumentation comporte plusieurs étapes, dont certaines ne sont pas explicitées et/ou restent probablement plutôt obscures du point de vue des élèves. Nous donnons deux illustrations : d'une part, il est possible de se demander sur quelles bases il est établi que l'eau de la bouilloire commence à s'évaporer dès le début de l'expérience. En effet, dans la classe, le critère habituel de reconnaissance de l'évaporation réside dans le constat de la disparition d'une partie de l'eau liquide : or, la baisse du niveau de l'eau n'est pas perceptible pendant la période qui mène à l'ébullition, ce qui empêche ce constat d'être fait. Dans ce cas, comment peut-on réellement savoir que l'évaporation commence dès le début ? Les gouttes de buée sur les bords supérieurs de la bouilloire qui apparaissent tôt dans l'expérience auraient pu être un indice pertinent, mais seulement dans un cadre où le double changement d'état dont témoigne la buée (évaporation suivie d'une condensation) puisse être reconnu, ce qui n'est pas le cas de la classe à ce stade. D'autre part, Amélie passe directement de la déclaration que l'évaporation commence dès le début de l'expérience à l'affirmation que la vapeur d'eau est invisible. Elle n'établit pas de connexion explicite entre les deux propositions en développant l'idée que, puisque les

volutes blanches ne sont pas présentes alors que l'évaporation a déjà commencé, elles ne peuvent pas être de la vapeur d'eau, qui est donc invisible.

Ces limites détournent l'accès des élèves à la logique de l'argumentation de l'enseignante dont une part demeure implicite. Mais son argumentation les empêche aussi de mettre en relation l'ébullition avec le changement d'état que l'eau subit : dans le discours de l'enseignante, l'ébullition se réduit à l'apparition des grosses bulles et des volutes blanches de brume. Rien n'est dit quant à la possibilité d'une transition de phase liquide - gaz pendant l'ébullition, bien au contraire : puisque le changement d'état s'opère dès le début à travers l'évaporation, l'ébullition ne semble rien apporter de plus à ce niveau-là.

Dans tous les cas, la discontinuité que l'enseignante s'était attachée à esquiver précédemment se révèle davantage dans ce segment : les élèves qui ont classifié, comme le groupe d'Enis, la brume comme appartenant à la catégorie « vapeur », ceux qui avaient proposé, comme Marina, une expérience de vaporisation basée sur l'identification des volutes blanches de brume avec la vapeur, ceux qui ont défendu, comme Tobin, que les volutes blanches qui s'échappent de la bouilloire constituent du gaz, doivent renoncer à ces positionnements puisque la vapeur d'eau est maintenant déclarée invisible. Mais cette discontinuité n'est pas exprimée explicitement, et donc pas du tout prise en charge dans l'action conjointe enseignant-élèves. Comme c'est l'enseignante qui assume totalement la responsabilité de l'avancée du milieu, la discontinuité produite reste, en latence, au sein de la sphère privée de chaque élève.

7.4.3 Analyse de la quatrième phase N45a : l'étude de la condensation à travers deux expériences

Contextualisation de l'Extrait A5

Après l'étude de l'ébullition, l'enseignante demande, aux élèves, comment il est possible de transformer l'eau qui s'est évaporée et qui est à présent sous forme de gaz en eau liquide. Il est rapidement dégagé que, puisqu'il a fallu chauffer pour créer la vapeur d'eau, c'est en la refroidissant qu'elle retourne à l'état liquide. Après quelques échanges sur les moyens à mettre en œuvre pour refroidir la vapeur d'eau, l'enseignante décide et applique le protocole suivant : elle place, sur le trajet de la vapeur d'eau, un miroir froid.

Extrait A5 : l'enseignante établit que la buée et les nuages sont de l'eau à l'état liquide

335.Ens: (met le miroir au-dessus de l'eau de la bouilloire) qu'est-ce qui s'est passé ↑(passe dans les rangs pour montrer le miroir couvert de buée)

336.El: y a de la buée

337.Ens: y a de la ↑

338.El: buée

339.Ens: et la buée c'est quoi/ la buée c'est fait de quoi↑/ ce qu'on appelle la buée↑

340.Elg: c'est de l'eau évaporée

341.Ens: non c'est pas de l'eau évaporée/ là elle est pas évaporée/ regarde là/ elle est faite de quoi↑/ la buée elle est faite de quoi là↑/ vous me dites c'est de la buée/ la buée là c'est quoi↑/ si on la regarde de près elle est fabriquée de quoi↑

342.El: d'eau

343.Ens: d'eau quoi/ d'eau gaz/ d'eau liquide↑

344.El: d'eau gaz

345.El: de gaz

346.El: d'eau chaude

347.Ens: j'avais ma bouilloire euh (dessine au TN) je suis moins douée aujourd'hui que la semaine passée/ j'avais ma bouilloire chut/ j'ai de l'eau gaz qui est sortie chut/ là je le fais à la craie alors on la voit mon eau gaz mais nous là on la voyait pas/ j'ai de l'eau gaz qui est sortie d'accord/ on appelle ça de la vapeur d'eau/ elle est chaude↑/ elle est froide↑

348.El: elle est chaude

349.Ens: mon eau a chauffé suffisamment/ eh oh là y en a qui sont pas là/ mon eau/ vapeur d'eau c'était mon eau liquide qui a chauffé beaucoup qui est devenue gaz/ on appelle vapeur d'eau et puis paf je viens lui mettre un miroir// qu'en plus j'ai rafraichi/ mais celui de la salle de bain j'ai pas eu besoin de le mettre dans le frigo mais que j'ai rafraichi/ un miroir froid/ et mon eau vapeur elle va venir toucher le miroir froid et puis là ça va provoquer quoi/ vous quand vous touchez un glaçon/ quand vous touchez quelque chose de froid ça vous fait quoi/ David

350.Dav: ça nous fait ben

351.Ens: ça te fait quoi quand tu tiens un glaçon dans la main Alessia

352.Ale: ben ça fond

353.Ens: ça te fait froid à la main

354.El: ça fond

355.Ens: ça fond ça te fait/ ça te rafraichit/ ça va faire pareil/ la vapeur qui va lui arriver dessus il va la rafraichir et du coup ça sera plus du gaz ça va redevenir des petites gouttes d'eau sur mon miroir et ces petites gouttes d'eau c'est ce que vous appelez la buée chut/ Alexandra/ donc la buée c'est de l'eau qui est redevenue liquide (finit le dessin ; cf Figure 21) / c'est de l'eau qui était en gaz parce qu'elle était/ elle a été chauffée suffisamment pour devenir gaz/ elle se rafraichit et elle redevient liquide/ ok/ on va essayer de tourner la page dans votre livre/ page trente (les élèves vont à la page 30 du manuel) /à cette page trente/ y a l'exercice trois qui dit comment se forment les nuages vous avez vu/ alors on va essayer de faire un petit peu comme si/ même si on est/en classe on va modéliser ça/ chut/ qui peut lire ce qui écrit là/ comment se forment les nuages/ Marina vas-y

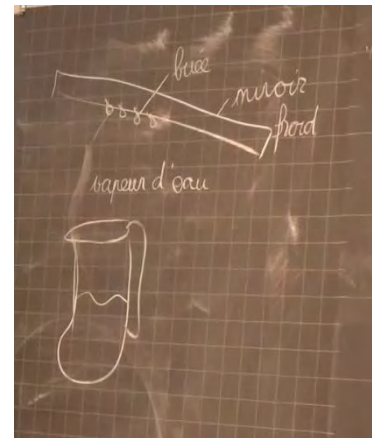


Figure 21 : Dessin de l'expérience au TN par Amélie

356.(Lecture du protocole de modélisation des nuages et mise en place de l'expérience : un récipient rempli d'eau chaude est recouvert avec un saladier ; cf. Figure 22) (...)

357.Ens: on voit de la buée/ vous voyez que l'air est un peu plus en plus/ on voit que les parois de mon verre est de moins en moins transparent parce que qu'est-ce qui est en train de se passer c'est que le gaz de l'eau est en train de venir se mettre sur la parois et de redevenir liquide/ quelque part là on est en train de former un petit peu un nuage/ imaginons que mon récipient là c'est la mer/ ou un lac/ ou un étang/ qui s'évapore avec la chaleur du soleil/ le contact avec l'air/ et/ sur la planète Terre cet air est contenu quand même avec la couche d'ozone/ cet air il va/ quand ce gaz va s'évaporer il va monter en altitude et puis on monte en altitude plus il fait

358.El: froid

359.Ens: froid/ donc mon gaz sous forme vapeur d'eau il va se rafraichir et en se rafraichissant il va se condenser on appelle ça et il va former un nuage/ mais alors parce qu'on vient de dire là Maël on est en train de se rendre compte Dayana/ que les nuages ils sont pas fabriqués avec de la vapeur/ que les nuages ils sont constitués de plein de toutes petites gouttes d'eau/ un nuage c'est pas de l'eau gaz/ un nuage c'est de l'eau liquide/ et quand il commence à y avoir beaucoup beaucoup de gouttes d'eau au bout d'un moment le nuage qui craque / hein/ va tomber en précipitation et ça va nous faire de la pluie/ d'accord/ donc c'est ça qui se passe/ donc oublier le fait que la vapeur qu'on voit/ le nuage qu'on voit qui sort de la bouilloire/ le nuage qu'on voit dans le ciel ce n'est pas de l'eau gaz/ c'est déjà de l'eau qui est en train de se refroidir et redevenir petite goutte d'eau ok/ ça c'est quelque chose de nouveau que vous ne pensiez pas/

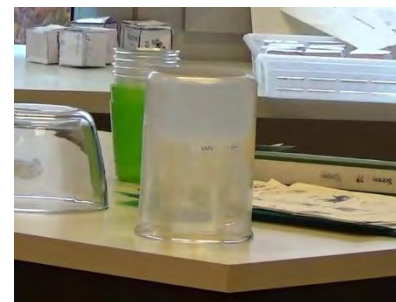


Figure 22 : Expérience de modélisation des nuages

Extrait A5 : l'enseignante établit que la buée et les nuages sont de l'eau à l'état liquide – S4 [(1:03:00) - (1:10:00)]

Analyse [mésoto/chronogénèse]

La plupart des objets introduits dans le milieu traitent de l'interprétation des deux expériences de condensation et de leur lien avec la formation des nuages.

- Première expérience

Lorsqu'Amélie passe dans les rangs pour montrer aux élèves le miroir couvert de buée, les élèves amènent rapidement l'objet « buée » (TdP 336, 338), qu'Amélie valide aussitôt (TdP 339). Amélie tente de leur faire préciser la nature de la buée : plusieurs objets sont apportés par les élèves pour répondre à cette demande (« de l'eau évaporée », TdP 340 ; « de l'eau », TdP 342). Ces objets sont désignés comme non-pertinents par l'enseignante (TdP 341 ; 343). Elle réduit alors le milieu en précisant ses attentes : il s'agit de déterminer si la buée est de « l'eau gaz » ou de « l'eau liquide » (TdP 343). Plusieurs élèves évoquent l'idée que la buée est de l'eau sous forme de gaz (TdP 344 ; 345). À partir de cet apport des élèves dans le milieu, l'enseignante se place dans une position surplombante dont elle ne ressort pas durant toute la durée de l'extrait. Elle développe alors le raisonnement suivant : lorsque l'eau sortie de la bouilloire, qui est sous forme de vapeur, entre en contact avec le miroir plus froid qu'elle, elle est rafraîchie et repasse à l'état liquide, sous forme de petites gouttes de buée (TdP 347 ; 349 ; 355).

- Seconde expérience

Amélie oriente ensuite le cours de l'action en proposant et mettant en œuvre une autre expérience de condensation assez similaire à la première : elle recouvre un petit récipient rempli d'eau chaude par un saladier. Elle remarque que les parois du saladier sont « de moins en moins transparentes » et qu'elles se couvrent de « buée » (TdP 357). Elle ajoute que « c'est l'eau sous forme de gaz qui redevient liquide » (TdP 357). Elle affirme que l'expérience effectuée modélise la formation des nuages (TdP 357) : lorsque l'eau des lacs ou des mers s'évapore, elle monte en altitude et se rafraîchit, ce qui l'amène à se condenser et à se transformer en nuages (TdP 357). Elle en déduit que les nuages sont constitués « de beaucoup de gouttes d'eau » et qu'ils sont formés d'eau à l'état liquide (TdP 359).

Au niveau topogénétique, l'enseignante prend totalement en charge l'avancée de la mésogénèse : c'est elle qui propose les protocoles d'expérience, qui exécute les expériences, qui interprète les observations et institutionnalise les résultats. Ses questions aux élèves sont triviales et/ou appelle une réponse binaire (en oui ou non).

Puisque c'est Amélie qui prend totalement en charge l'avancée de la mésogénèse, les objets introduits dans le milieu sont validés d'emblée, de par le statut de celle qui les produit. Le surplomb topogénétique permanent de l'enseignante dans cet extrait implique donc que la chronogénèse se superpose avec la mésogénèse.

Interprétation de l'Extrait A5

L'ensemble de l'étude de la condensation, qui clôt la partie de la séquence sur les états et les changements d'état, se termine par une montée topogénétique de l'enseignante, déjà amorcée lors de l'étude de l'ébullition.

Avant de revenir sur ce point, examinons la nature des rares objets introduits par les élèves. Lorsque l'enseignante leur demande de se prononcer sur l'état physique de la buée, ceux-ci la classent parmi les gaz. L'analyse des obstacles épistémologiques (cf. 6.2) a montré les racines de ce point de vue : la buée ne partage pas les propriétés usuelles attribuées aux liquides ; autrement dit, c'est un liquide au comportement très inhabituel pour qui la compare avec les autres manifestations classiques de l'eau liquide. D'autre part, il faut ici souligner que les élèves ont à disposition des éléments de la référence partagée concernant l'état liquide. Précédemment à l'étude de l'ébullition, une étude des propriétés de l'état liquide a été menée et a abouti à l'institutionnalisation de la Figure 23.

A retenir :
Pour transporter un liquide, il faut un récipient car on ne peut le saisir entre les doigts. L'eau liquide n'a pas de forme propre : elle prend celle de son récipient.

Les liquides ont une surface horizontale.

On ne peut pas comprimer un liquide.

Figure 23 : Institutionnalisation des propriétés de l'état liquide (extrait du dossier-élève)

Or, la buée telle qu'elle apparaît sur le miroir n'a ni récipient pour la contenir ni surface horizontale. Les indications données par les éléments de la référence déjà-partagée à propos de l'état liquide sont inutiles, voire contre-productives pour assurer une fondation à l'idée que la buée est constituée de gouttes d'eau sous forme liquide. Donc, quelle que soit la source sur laquelle les élèves se basent (vie quotidienne ou éléments de la référence déjà-partagée), il n'est pas étonnant qu'ils en arrivent à traiter la buée comme appartenant à l'état gazeux. C'est également la preuve qu'ils ne sont pas en mesure de rendre fonctionnel le rapport à l'objet « eau à l'état gazeux » qu'Amélie a institutionnalisé lors de l'expérience d'ébullition : l'eau à l'état gazeux est toujours invisible.

Dans ce cadre, Amélie prend en charge elle-même la construction de savoirs et est contrainte de gérer de front l'interprétation de l'expérience de condensation et l'élucidation de la nature de la buée. En faisant cela, elle provoque une discontinuité forte entre les rapports que les élèves entretiennent aux objets « buée » et « nuages » et les rapports qu'elles souhaitent promouvoir.

La séquence sur les états et les changements d'état de l'eau est sur le point de s'achever : un exercice de récapitulation des connaissances vient la clore tout à fait.

7.4.4 Analyse de la cinquième phase N51c : la catégorisation des objets de la vie quotidienne (nuage, buée, brouillard, etc.)

Contextualisation de l'Extrait A6

En guise de clôture finale de la partie sur les états et les changements d'état de l'eau, Amélie propose ensuite un exercice similaire à celui d'ouverture de la séquence : il s'agit de catégoriser des objets / phénomènes de la vie quotidienne faisant intervenir de l'eau (le verglas, les nuages,

la neige, le brouillard, l'eau du robinet, la vapeur d'eau, les icebergs, la pluie, la grêle, l'eau de la rivière).

Néanmoins, la tâche se révèle légèrement différente en fin de séquence : les élèves sont confrontés à des images des phénomènes, et non pas à des photographies (sauf pour le brouillard) ; leur nombre est moins élevé que précédemment ; et surtout, le critère de catégorisation est clairement donné à travers la légende : il s'agit de colorier la pastille en bleu si le phénomène fait intervenir de l'eau à l'état liquide ; en jaune s'il y a de la vapeur d'eau ; en rouge si l'eau est à l'état solide (cf. Figure 24, p. 182).

Les élèves travaillent individuellement à cet exercice ; l'extrait démarre au moment de la mise en commun au sujet des nuages et du brouillard.

Analyse a priori de la situation

Du point de vue des élèves, le travail à accomplir pour classer les nuages et le brouillard sous l'état approprié diffère. Le statut des nuages vient d'être traité à travers deux expériences de condensation : il a été clairement institutionnalisé que les nuages sont formés de petites gouttes d'eau et appartiennent donc à l'état liquide. Pour le classer sous l'état approprié, il suffit que les élèves restituent tel quel un élément de la référence déjà-partagée. Le statut du brouillard, pour sa part, n'a pas encore été débattu ; pour le classer sous l'état liquide, il faudrait que les élèves repèrent la buée ou les gouttelettes d'eau qui l'accompagnent ou bien qu'ils établissent des connexions entre brouillard et nuage. Le pas à franchir est donc bien plus important dans le cas du brouillard que dans le cas des nuages.

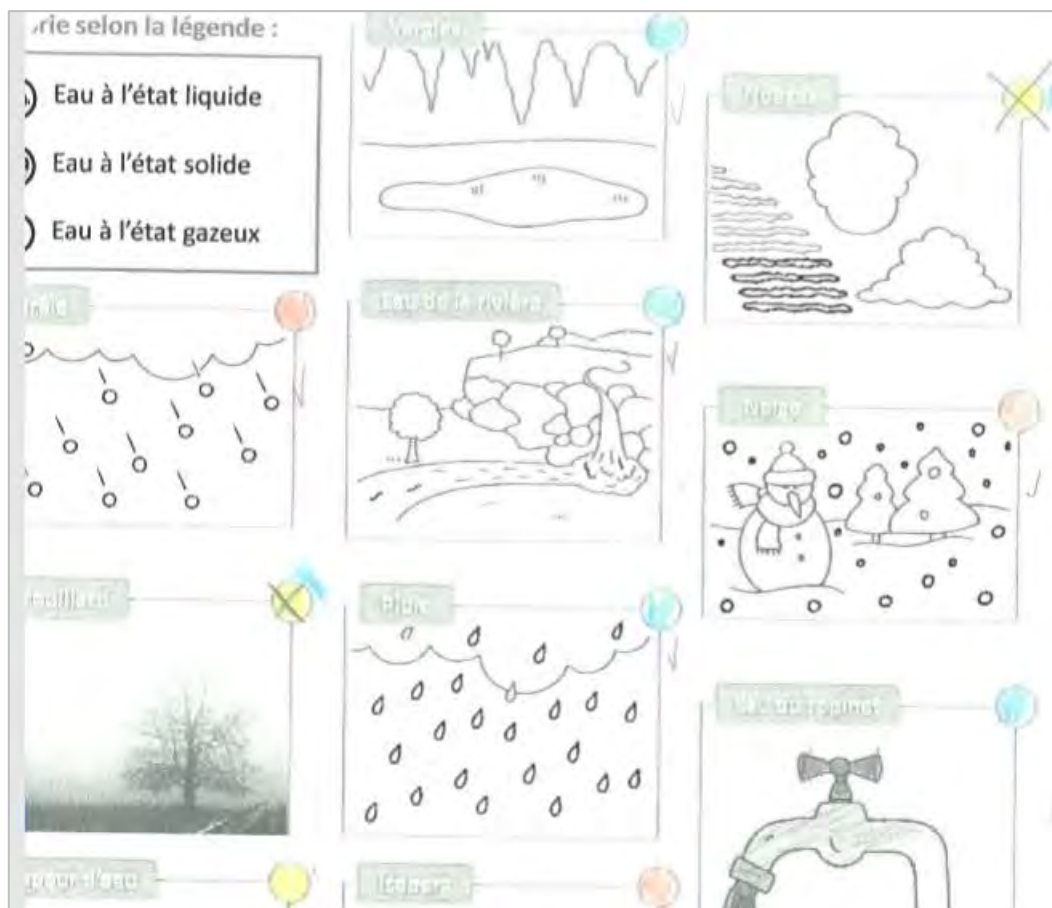


Figure 24 : Extrait de la fiche-élève (Tomas) de catégorisation des phénomènes liés à l'eau

Légende : Bleu : eau liquide/Rouge : eau solide /Jaune : vapeur d'eau

Extrait A6 : catégorisation des nuages et du brouillard

430. Ens: euh le nuage/ alors ça j'espère que attention si y a un piège c'est celui-ci/ Amélia↑
 431. Mad: c'est gazeux
 432. Ens: elle est tombée dans le piège les deux pieds dedans
 433. Sof: liquide
 434. Ens: liquide c'est déjà le gaz qui s'est condensé/ d'accord/ c'est curieux hein parce qu'il est au-dessus de nous mais qu'il pleut pas tout le temps le nuage mais il n'empêche qu'il est constitué de petites gouttes donc il est considéré comme liquide// on continue avec le brouillard/ ah ah oui c'est le deuxième piège celui-là/ euh Dayana↑
 435. Day: du gaz ↑/solide↑
 436. Ens: c'est déjà de la condensation// je vous rappelle quand c'est gaz ça se voit pas/ brouillard/ le brouillard c'est déjà de l'eau qui se condense dans l'air donc c'est déjà liquide

Extrait A6 : catégorisation des nuages et du brouillard – S4 [(1:18:00) - (1:20:00)]

Analyse [méso/topo/chronogène]

Dans une posture surplombante, Amélie traite les réponses apportées par les élèves au sujet de l'état physique des nuages et du brouillard.

Elle dirige l'attention des élèves sur le fait que le statut des nuages constitue « un piège » (TdP 430). L'objet « c'est gazeux » (TdP 431) est alors amené par Madeleine pour qualifier les nuages. Amélie désigne comme non-pertinent cet objet en affirmant que Madeleine « est tombée dans le piège les deux pieds dedans » (TdP 432). Sofia propose alors « liquide » que

l'enseignante valide et complète en affirmant que le nuage, c'est « le gaz qui s'est condensé », qu'« il est constitué de petites gouttes » et est donc « liquide » (TdP 434).

Comme précédemment, elle attire l'attention des élèves sur le fait que le brouillard est « le deuxième piège » de l'exercice (TdP 434). Les objets « du gaz » puis « solide » (TdP 431) sont successivement introduits par Dayanna pour qualifier le brouillard. Amélie les désigne comme non-pertinents et impose à la place un autre rapport à objet « brouillard » : c'est déjà de « l'eau qui se condense donc c'est déjà liquide » (TdP 436).

Interprétation de l'Extrait A6

La place finale de cette tâche de catégorisation au sein de la séquence sur les états et les changements d'état de l'eau, la position surplombante invariable que prend l'enseignante pour réguler les rapports aux objets des élèves, le rythme soutenu de l'avancée des savoirs (le brouillard est traité en deux tours de parole) sont des signes qui montrent qu'Amélie considère cette tâche comme un réinvestissement de savoirs déjà connus et non comme une co-construction de nouveaux savoirs. Ce point de vue sur la tâche éclaire sa manière de gérer le milieu : elle ne demande pas de justification aux élèves lorsqu'ils se trompent dans leur manière de classer et se contente d'asséner la réponse « correcte ». Selon elle, si les élèves ne savent pas, c'est qu'ils n'ont pas été assez attentifs au déroulement des activités précédentes. Pourtant, nous avons montré que, de leur point de vue, le pas à franchir est bien plus important dans le cas du brouillard que des nuages : la gestion similaire des deux objets / phénomènes dans la discussion collective démontre que l'enseignante n'a pas anticipé les difficultés potentielles que la classification du brouillard est susceptible de poser.

Le recueil des traces écrites des élèves nous permet de proposer une analyse quantitative du traitement individuel de ces deux phénomènes par les élèves. Lors de l'exercice, 17 élèves (sur les 18 présents) colorient la pastille correspondant au brouillard en jaune, ce qui signifie qu'ils estiment que le brouillard correspond à l'état gazeux de l'eau. Ce haut pourcentage confirme que la classification du brouillard est une tâche difficile, même lorsque la buée et les nuages ont été précédemment élucidés.

Plus révélateur encore, 10 élèves considèrent que les nuages sont à l'état gazeux. Plus de la moitié des élèves n'ont donc pas intégré à leurs actions le nouveau rapport à l'objet « nuages » institutionnalisé par l'enseignante lors des expériences de condensation. Ce pourcentage montre que le décalage entre les rapports aux objets que les élèves expriment et ceux que valide l'enseignante s'est creusé de telle manière que les élèves s'en remettent à leurs références premières pour faire sens de la tâche donnée (classer les nuages). La discontinuité qui était jusque-là en latence se révèle pleinement dans cet extrait dans lequel le décalage entre temps d'enseignement et temps d'apprentissage est flagrant. Les rapports aux objets « état gazeux de l'eau », « vapeur d'eau », d'une part et aux objets ambigus faisant intervenir de l'eau (« brouillard », « nuages », etc.), d'autre part ne montrent pas d'évolution depuis la première tâche de la séquence.

7.5 Synthèse de l'analyse des différents extraits : dynamique de construction des savoirs et schémas d'action

La dynamique de construction des savoirs dans la classe d'Amélie est résumée dans les tableaux ci-dessous qui retracent l'évolution des objets principaux du milieu (O1, O2, O3, etc.). Nous en effectuons une synthèse ci-dessous.

Les élèves sont d'abord amenés à imaginer un système de classification pour catégoriser 20 photographies faisant intervenir de l'eau :

Catégorisation des 20 photographies :

- 1) Vapeur (brume, brouillard, vapeur, buée, nuages) / les durs (iceberg, cristaux, glaçons, gelée, verglas) / liquide (rivière, mer, lac) / ce qui tombe (grêle, pluie, rosée) / les mous (banquise, glacier, givre, neige)
- 2) Évaporisé (nuages, vapeur, brume brouillard, buée) / liquide (givre, pluie, rosée, lac, mer) / glacier, dur (gelée blanche, grêle, verglas, cristal de glace, etc.)
- 3) Les choses du matin/les choses froides/les choses transparentes / la pluie et la grêle / les choses liées à la montagne

Catégorisation privilégiée : les états de la matière

- 4) En sciences, on utilise la catégorisation des états de la matière : liquide / solide (~glacier, dur) / gaz (~vapeur, évaporé, fantôme)

Les objets introduits par les groupes d'élèves (O1, O2, O3) témoignent de la multiplicité des systèmes de classification, qui varient en fonction des critères choisis : le comportement de l'eau, son apparence, sa forme, etc. Amélie introduit alors la catégorisation privilégiée des états de la matière : solide, liquide, gaz (O4). Dans une tentative d'atténuer la discontinuité d'avec les objets amenés des élèves, elle rabat :

- La catégorie « gaz » avec ce que les élèves ont appelé « vapeur », « évaporé » ou « fantôme »
- La catégorie « liquide » avec ce que les élèves ont appelé « liquide »
- La catégorie « solide » avec ce que les élèves ont appelé « dur » ou « glacé »

Par ce mouvement, elle prétend que le savoir visé correspond en tout point à ce que les élèves eux-mêmes avaient dégagé de l'analyse des photographies, comme s'il suffisait de faire la synthèse des propositions des élèves pour aboutir spontanément aux états de l'eau. Nous avons déjà démontré l'incohérence de ce point de vue : les catégories des groupes d'élèves sont susceptibles de contenir des objets / phénomènes qui n'y seraient pas placés du point de vue scientifique. Un exemple typique concerne la catégorie « vapeur » que certains groupes ont amenée dans le milieu : elle contient très souvent le brouillard, les nuages, la brume et la buée qui sont tous constitués de petites gouttes et appartiennent, de fait, à l'état liquide. Mais, comme l'enseignante assimile la catégorie « vapeur » des élèves à la catégorie « gaz » qu'elle introduit

elle-même, les élèves peuvent continuer à conceptualiser le gaz de telle manière qu'il recouvre tous ces phénomènes ambigus (brume, nuages, etc.).

Les implications de cette manière de faire avancer le savoir ne se font pas attendre : lors de l'étude de l'ébullition, quand Amélie demande aux élèves d'imaginer une expérience qui permet de transformer l'eau liquide en vapeur d'eau, voici les objets qu'ils amènent dans le milieu :

Étude de l'ébullition

Choix d'une expérience de transition liquide-gaz

- 5) Faire un feu pour obtenir du gaz (gaz ~ fumée)
- 6) Provoquer des décharges électriques (gaz~ fumée ?)
- 7) Chauffer l'eau au Soleil ou sur une cuisinière
- 8) Prendre une douche (gaz ~ volutes blanches de brume)
- 9) Abaisser la température (gaz ~ volutes blanches de brume)
- 10) **Expérience choisie** : faire chauffer l'eau dans une bouilloire
- 11) Les volutes blanches qui s'échappent de la bouilloire sont de l'eau sous forme de gaz.
- 12) L'eau commence à s'évaporer avant l'ébullition : l'eau sous forme de gaz est invisible.

À travers la tâche précédente de catégorisation des 20 photographies, certains élèves ont été confortés dans l'idée que les volutes blanches de brume signent l'état gazeux de l'eau : les expériences qu'ils proposent sont des expériences dans lesquelles ces volutes blanches sont susceptibles d'apparaître, dans la salle de bains ou encore lorsque de l'eau chaude est apportée dans un environnement froid (O8 et O9). Ce sont des expériences de condensation. D'autres élèves assimilent l'état gazeux de l'eau à la fumée qu'ils cherchent à produire en démarrant des combustions ou des étincelles (O5 et O6). Il s'avère que ces expériences, qui se fondent sur des conceptualisations erronées de l'état gazeux de l'eau, se déroulent au sein d'environnements chauffés. Amélie s'appuie sur cet élément contingent des objets introduits par les élèves pour promouvoir sa version du changement d'état liquide - gaz : l'eau sera mise à chauffer dans une bouilloire (O10). Les objets amenés par les élèves (O5, O6, O7, O8, O9) reflètent des rapports aux objets « gaz », « vapeur », « brume », « fumée » dont l'évolution est au centre des enjeux de savoir visés dans la séquence : pourtant, ils ne sont pas négociés dans l'action conjointe, mais au contraire, contournés au profit de l'expérience attendue. Sur ces points, le savoir n'avance pas vraiment.

Comme dans la phase précédente, l'enseignante sur-interprète le sens que les élèves donnent aux objets du milieu afin de proposer une continuité de façade entre ce qu'ils produisent et ce qu'elle a décidé de valider dans le milieu. Cette continuité de façade permet de garder intacte la relation didactique entre Amélie et les élèves mais a un effet pervers principal : puisque leurs rapports aux objets n'ont pas été négociés, les élèves n'ont pas d'élément pour juger de leur

bien-fondé. Ils sont alors susceptibles de rester sur leurs références premières pour continuer de se repérer au sein des tâches suivantes que leur propose l'enseignante. C'est exactement ce qu'il se passe lors de la réalisation de l'expérience d'ébullition : la plupart des élèves soutiennent que les volutes blanches de brume qui s'échappent de la bouilloire au moment de l'ébullition sont de l'eau sous forme de gaz (O11), ce qui n'a rien d'étonnant puisque c'est cette même idée qui les a guidés pour proposer une expérience de transition liquide-gaz pour l'eau. L'enseignante déploie alors un raisonnement épistémiquement intéressant mais peu accessible aux élèves : puisque l'eau commence à s'évaporer dès le début de l'expérience et que les volutes blanches n'apparaissent qu'à l'ébullition, l'eau sous forme de gaz est invisible (O12). C'est la première fois qu'une caractéristique de l'eau sous forme de gaz apparaît dans le milieu. La rupture que celle-ci amène vis-à-vis des rapports que les élèves ont exprimés jusque-là au sujet de l'objet « eau sous forme de gaz » est importante : néanmoins, comme cette discontinuité n'est pas du tout prise en charge dans l'action conjointe enseignant-élèves, elle reste, en latence, au sein de la sphère privée de chaque élève.

Les élèves sont ensuite amenés à commenter brièvement le résultat des expériences de condensation :

Étude de la condensation

13) La buée est de l'eau sous forme de gaz

14) Lorsque la vapeur d'eau entre au contact d'un objet froid, elle se re-transforme en liquide, sous forme de petites gouttes de buée ou des nuages.

Les élèves qui ont l'occasion de s'exprimer soutiennent que la buée qui apparaît sur le miroir est de l'eau sous forme de gaz (O13). Nous constatons donc que les élèves continuent de s'appuyer sur leurs références initiales à propos de l'objet « eau sous forme de gaz ». À ce stade, puisque les élèves restent sur leurs références premières, le fossé est trop important pour que l'enseignante travaille réellement ces objets pour faire avancer le savoir. Elle n'a plus qu'une seule posture à disposition pour faire avancer le savoir : le surplomb topogénétique. C'est elle qui prend en charge la totalité de l'interprétation des deux expériences de condensation : lorsque la vapeur entre au contact d'un objet plus froid qu'elle, de petites gouttes de buée apparaissent, témoin de la transformation de la vapeur en liquide (O14). Elle affirme également que c'est ce qu'il se passe lorsque des nuages apparaissent (O14). Comme précédemment, la discontinuité engendrée par ces affirmations n'est pas du tout prise en charge dans l'action conjointe enseignant-élèves et reste en suspens au sein de la sphère privée de chaque élève.

Au final, la dynamique de construction des savoirs donne à voir une certaine régularité dans les schémas d'action de l'enseignante. Amélie laisse transparaître un refus d'imposer d'emblée aux élèves les modélisations des états de l'eau et une volonté forte que l'avancée des savoirs se fonde sur ce que les élèves apportent dans le milieu. Mais cette volonté produit rapidement un cercle vicieux en termes de construction des savoirs. Puisque l'enseignante ne veut rien imposer aux élèves mais que ce qu'ils apportent dans le milieu est très éloigné des savoirs visés, elle est contrainte de prétendre à un soi-disant consensus qui s'appuie sur les caractéristiques superficielles des objets amenés par les élèves et en ignore les défaillances profondes. La

référence commune se construit sur un malentendu entre le sens que lui donne l'enseignante, d'une part et les élèves, d'autre part. L'ambiguïté de cette référence commune pousse les élèves à ne pas reconnaître les faiblesses de leur point de vue au sujet des caractéristiques des états de l'eau. Lors des tâches suivantes, ils restent sur leurs références initiales : ils ne produisent de nouveau aucun objet exploitable sur lesquels l'enseignante pourrait s'appuyer pour faire avancer le savoir. L'espace de négociation de ces rapports aux objets est tellement étroit que l'enseignante ne dispose que deux solutions :

- soit elle réutilise la même technique et feint de s'appuyer sur des éléments insignifiants du milieu qui sont communs à plusieurs propositions d'élèves, ce qui a pour effet d'empêcher les élèves d'accéder aux traits pertinents des objets du milieu et bloque l'avancée des savoirs. C'est l'option qu'elle choisit de prendre jusqu'à la décision de l'expérience de transition liquide-gaz.
- soit les objets introduits par les élèves sont tellement incompatibles avec les savoirs visés qu'il n'y plus moyen de les détourner pour prétendre construire conjointement le savoir. Dans ce cas, Amélie se place en position de surplomb topogénétique et fait avancer (seule) le savoir. C'est ce qui se produit lors de l'interprétation des expériences d'ébullition et de condensation.

Au final, la variation minime de posture topogénétique dont fait preuve l'enseignante ne reflète que l'absence de potentiel d'exploitabilité des objets et rapports aux objets des élèves qui ne décollent pas du point de vue quotidien sur les états de l'eau tout au long de la séquence.

La montée topogénétique dont fait preuve Amélie lors des expériences d'ébullition et de condensation institutionnalise certains traits pertinents d'une modélisation des états de l'eau : la vapeur d'eau est invisible ; la buée et les nuages sont constitués de petites gouttes d'eau, et sont donc liquides. Cependant, lors de l'exercice de récapitulation des connaissances de la fin de la séquence, les élèves produisent les objets suivants :

Comment catégoriser certains phénomènes sous l'état approprié ?

- 15) Les nuages sont faits d'eau sous forme de gaz (10/18) **Vs** eau liquide (8/18)
16) Le brouillard est fait d'eau sous forme de gaz (17/18) **Vs** eau liquide (1/18)

Alors que les nuages viennent d'être catégorisés par l'enseignante comme étant à l'état liquide, plus de la moitié des élèves estiment encore, comme lors de la toute première tâche de la séquence, qu'ils partagent davantage de points communs avec l'état gazeux (O15). Quant au brouillard sur lequel l'enseignante n'a pas encore statué, la quasi-unanimité des élèves le situe également du côté de l'eau sous forme de gaz (O16). Les élèves n'ont donc pas tiré profit des traits pertinents de la modélisation des états de l'eau récemment institutionnalisés, peut-être parce que ceux-ci arrivent trop tard dans la séquence ou que l'enseignante n'a fait aucun geste pour qu'ils s'en emparent. Dans tous les cas, les élèves ne font preuve d'aucune marge d'autonomie par rapport à la modélisation des états de l'eau qu'ils ne tentent pas de mobiliser pour la détermination de l'état des nuages ou pour celle du brouillard. À ce stade, cette

modélisation est un savoir inerte, qu'ils ne sont ni capables de restituer ni d'utiliser pour générer de nouveaux savoirs.

En conclusion, le refus d'imposer dès le départ certains savoirs qui ne peuvent pas être découverts seuls par les élèves entraîne très paradoxalement un rétrécissement de la marge d'action de l'enseignante qui n'a pas d'autre option que de se placer en position de surplomb si elle veut faire avancer les savoirs mais aussi un rétrécissement de la marge d'action des élèves qui ont recours à des savoirs issues de la vie quotidienne jusqu'à la fin de la séquence et ne participent jamais vraiment à la dynamique de construction des savoirs.

Quel degré de continuité entre les rapports aux objets construits par les élèves et ceux visés par l'enseignante ?

Dès le début de la séquence, les élèves d'Amélie ont l'occasion d'exprimer leurs premières idées par rapport aux objets « vapeur d'eau », « état gazeux de l'eau », « nuage », « brouillard », etc., parmi lesquelles :

- La vapeur d'eau correspond aux volutes blanches de brume/brouillard/nuages
- L'état gazeux de l'eau correspond à la fumée, etc.

Les gestes d'Amélie maintiennent ensuite une ambiguïté persistante quant à la validité de ces premières idées, ambiguïté qui se prolonge jusqu'au milieu de la séquence. Les élèves ne peuvent se positionner seuls sur la pertinence des rapports initiaux aux objets « vapeur d'eau », « état gazeux de l'eau », « nuage », « brouillard », etc., qu'ils ont eux-mêmes déployés. Ils continuent alors à les utiliser pour donner du sens et se repérer dans les tâches suivantes. Du point de vue du chercheur, les gestes d'Amélie se focalisent sur les caractéristiques superficielles et contingentes des propositions des élèves. Ils masquent ainsi la discontinuité entre les rapports aux objets que les élèves ont construits et ceux qu'elle sait être les objectifs en termes de savoir.

Puis, lors des expériences d'ébullition et de condensation, Amélie introduit brusquement une succession de nouveaux rapports à ces objets, qui sont discontinus avec les premières idées des élèves :

- La vapeur d'eau est invisible
- La brume, la buée, les nuages sont de l'eau sous forme liquide, etc.

L'écart avec les premières idées des élèves est tel que la plupart d'entre eux ne parvient pas à rendre fonctionnels ces nouveaux objets apportés par Amélie. Les élèves continuent de mobiliser leurs rapports initiaux aux objets lors de la tâche finale de récapitulation des savoirs.

En résumé, l'étude de la dynamique de construction des savoirs révèle une continuité « de surface » entre les rapports aux objets construits par les élèves et ceux visés par l'enseignante jusqu'au milieu de la séquence, suivie d'une discontinuité nette qui ne parvient pas à se résorber et qui dure jusqu'à la fin de la séquence.

Quels schémas d'action l'enseignante développe-t-elle au cours de la négociation des rapports aux objets avec les élèves pour atteindre ce degré de continuité ?

A1) Amélie sollicite constamment les élèves pour donner leur avis et fait en sorte que la construction des savoirs semble se fonder sur les éléments du milieu apportés par les élèves, au risque d'une déformation de la signification de ces éléments. Plusieurs productions d'élève sont qualifiées d'« hypothèses » : les idées d'expériences des élèves pour transformer de l'eau liquide en eau sous forme de gaz ; les anticipations des élèves à propos de la température de ce changement d'état ; lorsque certains élèves soutiennent que la vapeur est visible et que d'autres défendent le contraire, il s'agit de « deux hypothèses qui s'affrontent », selon Amélie.

A2) Elle introduit et institutionnalise la plupart des éléments de modélisation des phénomènes d'évaporation et condensation à la fin de la séquence. Ces éléments, qui permettent une compréhension des phénomènes observés ne sont pas (re)mis à l'épreuve, car la séquence est clôturée peu après.

A3) Elle confronte les élèves à l'observation directe de certains phénomènes physiques, qu'elle met en place sans contextualisation préalable dans le milieu : par exemple, l'analyse des vingt photographies de paysages naturels soumis à des variations de conditions météorologiques est censée permettre aux élèves de construire les catégories [liquide, solide, gaz]. Hors, ces illustrations présentées sans cadre interprétatif peuvent donner lieu à de multiples catégorisations qui ne rentrent pas dans les objectifs de la séquence.

La conjonction de ces schémas d'action permet d'éclairer les conclusions à propos des degrés de continuité :

- Amélie fait d'abord en sorte que la construction des savoirs se fonde sur les éléments du milieu apportés par les élèves (A1) mais comme elle n'apporte d'emblée aucun élément de modélisation (A2) et que l'observation empirique n'est pas suffisante (A3), les élèves ne disposent d'aucune ressource pour développer de nouveaux rapports aux objets sur lesquels elle pourrait s'appuyer. Amélie doit alors surinterpréter les apports des élèves dans le milieu afin qu'ils s'alignent avec les enjeux de savoirs visés (effet Jourdain). Il ne s'agit pourtant que d'une « continuité de surface », puisqu'elle est construite unilatéralement par l'enseignante en fonction des modèles dont elle dispose (et des objectifs de savoirs que l'institution scolaire lui désigne), et dont les élèves ne disposent pas (encore).
- Plus la séquence avance, plus cette position est difficile à tenir. Puisque le potentiel d'exploitabilité des propositions des élèves est toujours aussi faible (A1, A2, A3), elle finit par basculer dans une position de surplomb topogénétique pour amener dans le milieu l'ensemble des éléments de modélisation visés, puis clôt la séquence tout de suite après (A2), sans avoir résorbé la discontinuité générée par leur introduction.

Chapitre 8 ANALYSE EMPIRIQUE D'UNE CLASSE AU PRIMAIRE EN FRANCE : LOUISE

8.1 Présentation du contexte de la classe de Louise

Nous présentons le contexte de la classe de Louise, en donnant quelques repères par rapport à l'école et la classe ainsi que l'enseignante.

8.1.1 L'école et la classe

L'école primaire se situe à la périphérie d'une grande ville de province (Toulouse). Elle appartient au réseau d'éducation prioritaire renforcé (REP+)¹⁷ et est situé en Zone Prévention Violence, ce qui donne droit à des moyens supplémentaires, notamment un effectif limité à 21 élèves et la présence d'un maître surnuméraire.

La classe observée correspond au niveau CM1 (c'est-à-dire des élèves âgés de 9 à 10 ans, qui sont dans l'avant-dernière année du primaire supérieure). La classe comprend 23 élèves.

Selon l'enseignante, plusieurs élèves présentent des difficultés particulières : un élève présente de graves troubles du comportement, deux élèves ne lisent pas du tout, trois élèves déchiffrent avec un niveau équivalent à celui d'un élève à l'entrée du CP. De plus, à cause de l'absence de l'enseignant titulaire l'année précédente qui a entraîné une rotation de remplaçants, les élèves ont perdu des habitudes de travail. Le niveau est hétérogène mais même les élèves déclarés comme « bons » par Louise souffrent de lacunes en français.

8.1.2 L'enseignante

Après un baccalauréat littéraire, Louise a obtenu une maîtrise en histoire de l'art. Elle enseigne à l'école primaire depuis 15 ans et est devenue maître-formateur l'année précédente. Elle est également titulaire d'un Master en sciences de l'éducation (parcours : formation de formateurs d'enseignants) obtenu deux années auparavant. Par le jeu des mutations dû à sa promotion en tant que maître formateur, elle ne reste qu'un an dans l'école observée et n'y enseigne donc que depuis quelques mois.

Elle est régulièrement engagée dans plusieurs projets liés aux sciences dont : le congrès scientifique des enfants sur le thème du système scolaire ; la Semaine de la Science ; le projet Écosystème de la mare avec l'ASTEP, projets pour lesquels elle bénéficie de l'appui des enseignants-ressources en sciences de l'académie de Toulouse ou de doctorants en sciences de l'Université de Toulouse – Paul Sabatier. Elle déclare profiter le plus possible des ressources et moyens humains et matériels mis à disposition par l'académie de Toulouse pour l'enseignement des sciences à l'école primaire.

¹⁷ Le réseau d'éducation prioritaire renforcé (REP +) fédère les écoles et établissements des territoires qui rencontrent les plus grandes difficultés sociales et a pour objectif de corriger l'impact des inégalités sociales et économiques sur la réussite scolaire par un renforcement de l'action pédagogique et éducative. Source : <http://www.education.gouv.fr/cid187/l-education-prioritaire.html>

Louise fait maintenant partie de l'équipe des enseignants-ressources en sciences de l'académie de Toulouse.

8.2 Présentation générale des séances observées

La partie observée dans la classe de Louise correspond à six séances pour un total de 6 heures filmées.

La séquence proposée par Louise est intégralement tirée d'une séquence mise au point par les enseignants-ressources en sciences de la Haute-Garonne dans le cadre des défis scientifiques du groupe Mathésciences. Ce groupe fait partie du centre départemental de ressources en sciences, qui propose, entre autres, des séquences pédagogiques et du matériel en prêt en mathématiques et en sciences¹⁸. Les défis du groupe Mathésciences sont diffusés chaque année parmi les enseignants de l'école primaire sur un thème différent du programme et sont déclinés en plusieurs versions selon le niveau considéré. Ils ont pour but de motiver les enseignants à proposer des séquences de sciences à l'école primaire. Ils aboutissent toujours à la fabrication d'un (ou plusieurs) montage(s) expérimental(aux) et s'accompagnent d'un espace en ligne qui permet aux classes qui le souhaitent d'exposer leurs montages finaux.

Cette séquence s'ouvre sur la présentation d'un « défi » qui propose aux élèves de trouver un moyen expérimental permettant de transformer l'eau de mer en eau potable afin de sauver la vie d'un personnage imaginaire, naufragé sur une île déserte, appelé Grandsoif¹⁹. La séquence s'achève avec la construction de plusieurs montages potentiellement pourvoyeurs d'eau douce et par l'évaluation du degré d'efficacité de chacun d'entre eux. Cette séquence vise à étudier les propriétés de la vapeur d'eau, de l'eau liquide, de l'évaporation, de la condensation et des mélanges aqueux (enjeu N+1). Des productions écrites relatives à cette séquence (le document-maître rédigé par les enseignants-ressources, les documents distribués aux élèves) se trouvent dans l'annexe B.

Cet enjeu global de niveau N +1 peut être décomposé en différents sous-enjeux de niveau N : le premier concerne la présentation du défi Grandsoif (N1) ; le second a trait à l'étude des propriétés de la vapeur d'eau, de l'eau liquide, de l'évaporation et de la condensation (N2) ; le troisième est relatif à l'étude des propriétés des mélanges aqueux (N3) ; le dernier relève de la conception et de la construction de plusieurs montages expérimentaux qui tentent de répondre au défi GrandSoif (N4).

Ces différents découpages sont résumés dans le synopsis ci-dessous (cf. Tableau 10, p. 193) :

¹⁸ Voir le site Internet du groupe : <http://pedagogie.ac-toulouse.fr/sciences31/spip.php?article1> Consulté le 24 avril 2018.

¹⁹ La séquence et le défi seront appelés séquence GrandSoif et défi Grandsoif dans la suite.

Enjeux de la séquence (niveau N+1)	Enjeux de niveau N
Etude des propriétés de la vapeur d'eau, de l'eau liquide, de l'évaporation, de la condensation et des mélanges aqueux	Présentation du défi Grandsoif S1 [46 min] N1
	Etude des propriétés de la vapeur d'eau, de l'eau liquide, de l'évaporation et de la condensation S1-S2-S3-S4-S5-S6- ... [>4h30] N2
	Etude des propriétés des mélanges aqueux <i>Non filmé</i> N3
	Conception et construction du montage expérimental pour répondre au défi GrandSoif <i>Non filmé</i> N4

Tableau 10 : Synopsis de la séquence de la classe de Louise

Puisque nous visons à retracer comment la notion de vapeur d'eau se construit dans la classe, en lien avec les changements d'état qu'elle subit, nous nous intéressons à l'enjeu N2 qui correspond à la partie grisée du Tableau 10 : l'étude des propriétés de la vapeur d'eau, de l'eau liquide, de l'évaporation et de la condensation. Nous l'analysons donc en détail ci-dessous.

8.3 Présentation de l'enjeu N2 étudié : Étude des propriétés de la vapeur d'eau, de l'eau liquide, de l'évaporation et de la condensation

8.3.1 Description générale de l'enjeu N2 : Étude des propriétés de la vapeur d'eau, de l'eau liquide, de l'évaporation et de la condensation

L'enjeu N2 est constitué de plusieurs enjeux de niveaux inférieur N-1 : la mise en évidence du phénomène de disparition de l'eau liquide laissée à l'air libre (N21) ; l'interprétation de ce phénomène à l'aide des notions de vapeur d'eau, d'eau liquide, d'évaporation et de condensation (N22) ; la mise en évidence des facteurs d'accélération de l'évaporation (N23) ; et enfin, la catégorisation des phénomènes / objets de la vie quotidienne faisant intervenir de l'eau sous l'état approprié (N24) (cf. Tableau 11, p. 194).

Enjeux de niveau N	Enjeux de niveau N-1	Phases d'action <i>Apports principaux dans la mésogenèse en termes de contenus</i> Résultats d'institutionnalisation en gras
Etude des propriétés de la vapeur d'eau, de l'eau liquide, de l'évaporation et de la condensation N2	Mise en évidence du phénomène de disparition de l'eau liquide laissée à l'air libre N21	Consigne <i>Consigne : prévoir ce que devient de l'eau placée dans un récipient à l'air libre et dessiner deux schémas représentant l'eau à une semaine d'intervalle</i> Collectif - S1(46' – 52') N21a
		Prévision et représentation du devenir de l'eau laissée à l'air libre Individuel - S1(52' – 62') N21b
		Mise en commun des prévisions relatives au devenir de l'eau & mise en place de l'expérience <i>Une petite quantité d'eau est placée dans une éprouvette en hauteur.</i> Collectif - S1(62' – 76') N21c
		Observation de l'eau laissée à l'air libre dans l'éprouvette Le niveau de l'eau a diminué. Collectif - S2(0' – 7') N21d
	Interprétation du phénomène de disparition de l'eau liquide à l'aide des notions de vapeur d'eau, d'eau liquide, d'évaporation et de condensation N22	Consigne <i>Consigne : expliquer la disparition de l'eau/qu'est devenue l'eau disparue ?</i> Collectif - S2(7' – 12') N22a
		Production d'explications relatives au devenir de l'eau disparue Collectif - S2(12' – 19') N22b
		Mise en commun des explications des élèves relatives à la disparition de l'eau liquide <i>L'eau a été absorbée par le récipient / l'eau s'est évaporée à cause de la chaleur, du Soleil/elle est partie dans l'air, dans le ciel, dans les nuages / elle est devenue de la buée, etc ;</i> Collectif - S2(19' – 28') N22c
		Lecture, commentaires et résumé d'un document sur l'évaporation et la condensation Lorsqu'on laisse à l'air libre un récipient contenant de l'eau, au bout d'un certain temps, on constate que la quantité d'eau a diminué : l'eau s'est évaporée. Ce phénomène s'appelle l'évaporation de l'eau, il correspond à la transformation de l'eau liquide en vapeur d'eau. La vapeur d'eau est de l'eau sous forme de gaz. Ce gaz est invisible et il n'a pas d'odeur. Lorsqu'un nuage (fines gouttelettes en suspension) ou de la buée (fines gouttelettes sur un support) apparaît, c'est la vapeur d'eau invisible contenue dans l'air qui s'est transformée en eau liquide. Ce changement s'appelle la condensation de la vapeur d'eau. (...) Collectif - S3(4' – 22') N22d
		Consigne <i>Consigne : d'après le document, rédiger un court texte d'explication quant à la disparition de l'eau.</i> Collectif - S3(22' – 28') N22e
		Rédaction d'une explication relative à la disparition de l'eau Individuel/duo - S3(28' – 37') N22f
		Ré-Interprétation de la disparition de l'eau liquide en termes de changement d'état L'eau s'est évaporée : elle est devenue de la vapeur, c'est-à-dire une forme d'eau invisible (gaz). Collectif - S3(37' – 48') N22g
		Institutionnalisation des notions de vapeur d'eau et d'évaporation L'évaporation, c'est la transformation de l'eau liquide en vapeur d'eau. La vapeur, c'est de l'eau sous forme de gaz. Collectif - S3(48' – 55') N22h
	Mise en évidence des facteurs d'accélération de l'évaporation N23	(...) Les facteurs d'accélération de l'évaporation sont : la chaleur (soleil et micro-ondes), la surface en contact avec l'air et le vent. Collectif - S4(40' – 71') – S5(0' – 37') – S6(0' – 47')
	Catégorisation des objets de la vie quotidienne N24	Catégorisation des objets de la vie quotidienne sous l'état de l'eau approprié Exemples d'eau liquide : l'eau de la mer, l'eau des rivières, la buée, les nuages. Le brouillard ? Collectif - S6(47' – 58') N24a

Tableau 11 : Synopsis de l'enjeu N2 « Étude des propriétés de la vapeur d'eau, de l'eau liquide, de l'évaporation et de la condensation »

Enjeu N21 : Mise en évidence du phénomène de disparition de l'eau liquide laissée à l'air libre

Le traitement de cet enjeu se déroule en plusieurs phases d'action :

- Dans la première phase qui se déroule en collectif (N21a), Louise propose aux élèves de prévoir ce que devient une petite quantité d'eau quand on la laisse dans un récipient à l'air libre à travers la représentation de deux schémas représentant l'eau à une semaine d'intervalle.
- Dans la seconde phase (N21b), les élèves effectuent individuellement leur prévision et dessinent leurs schémas.
- Dans la troisième phase (N21c), une synthèse collective a lieu et mène au recueil d'une diversité de prévisions concernant l'expérience proposée par Louise. Celle-ci place une éprouvette remplie d'eau en hauteur dans un coin de la classe.
- Enfin, dans la dernière phase collective qui se situe le lendemain des précédentes (N21d), le comportement de l'eau de l'éprouvette est décrit et rapporté : lorsqu'on laisse de l'eau liquide dans une éprouvette à l'air libre, son niveau diminue progressivement.

Enjeu N22 : Interprétation de ce phénomène à l'aide des notions de vapeur d'eau, d'évaporation et de condensation

- Dans la première phase qui se déroule en collectif (N22a), Louise propose aux élèves d'imaginer une explication au sujet de la disparition de l'eau. Elle leur demande de déterminer ce qu'est devenue l'eau disparue.
- Dans la deuxième phase (N22b), les élèves s'essaient individuellement à cet exercice.
- Dans la troisième phase (N22c), une synthèse collective a lieu et mène au recueil d'une diversité d'explications concernant la disparition de l'eau. L'enseignante conclue sur la nécessité de recourir à des documents scientifiques pour trancher la question.
- Dans la quatrième phase (N22d), la classe lit, commente et résume un document sur l'évaporation et la condensation.

À propos de l'évaporation, on peut y lire :

« Lorsqu'on laisse à l'air libre un récipient contenant de l'eau, au bout d'un certain temps, on constate que la quantité d'eau a diminué : l'eau s'est évaporée. C'est le même phénomène qui se produit lorsque le linge sèche. L'eau qui imprègne le linge s'évapore. Ce phénomène s'appelle l'évaporation de l'eau, il correspond à la transformation de l'eau liquide en vapeur d'eau. La vapeur d'eau est de l'eau sous forme de gaz. Ce gaz est invisible et il n'a pas d'odeur. »

À propos de la condensation, on peut y lire :

« Lorsqu'un nuage (fines gouttelettes en suspension) ou de la buée (fines gouttelettes sur un support) apparaît, c'est la vapeur d'eau invisible contenue dans l'air qui s'est transformée en eau liquide. Ce changement s'appelle la

condensation de la vapeur d'eau. La formation de ces fines gouttelettes se produit lorsque la vapeur d'eau est refroidie au contact d'air froid : formation d'un nuage ou d'un objet froid : formation de buée. »

- Dans la cinquième phase qui se déroule en collectif (N22e), Louise demande aux élèves de produire un court texte écrit qui explique la disparition de l'eau de l'éprouvette en intégrant les apports du document qu'ils viennent de lire.
- Dans la sixième phase (N22f), les élèves rédigent individuellement ce court texte.
- Dans la septième phase de synthèse collective (N22g), il est établi que « l'eau de l'éprouvette s'est évaporée », c'est-à-dire qu'elle est « devenue de la vapeur ». Les élèves notent cette conclusion dans leur cahier de sciences.
- Dans la huitième phase (N22h), il s'agit de généraliser les propriétés précédentes qui n'ont été mises en évidence que pour la situation particulière de disparition d'eau liquide dans l'éprouvette à l'ensemble des situations d'évaporation. La conclusion de cette phase réside dans l'affirmation que « l'évaporation, c'est la transformation de l'eau liquide en vapeur d'eau » et que « la vapeur, c'est de l'eau sous forme de gaz ».

Enjeu N23 : Mise en évidence des facteurs d'accélération de l'évaporation

Sans rentrer dans le détail des nombreuses phases de cet enjeu que nous n'étudierons pas plus avant dans la suite, précisons que les facteurs suivants sont reconnus comme accélérant le processus d'évaporation de l'eau : la chaleur (à travers le Soleil et le four à micro-onde), la surface en contact avec l'air et le vent.

Enjeu N24 : Catégorisation des objets de la vie quotidienne (brouillard, nuage, buée, etc.)

Dans ce dernier enjeu qui ne contient qu'une phase d'action en collectif (N24a), Louise institutionnalise un lexique relatif aux états de l'eau (solide, liquide, gaz) puis demande aux élèves de catégoriser des objets/ phénomènes de la vie quotidienne (incluant la buée, les nuages, le brouillard) sous l'un ou l'autre des états de l'eau.

À ce stade, l'eau qu'on boit, l'eau de la mer, l'eau des rivières, les nuages et la buée sont catégorisés comme des exemples d'eau liquide autour de nous. Le brouillard n'est pas départagé clairement à la fin de la prise de données.

Ces différents enjeux sont décrits avec davantage de détails dans le synopsis ci-dessus (cf. Tableau 11, p. 194).

8.3.2 Choix des phases étudiées

À l'intérieur de l'étude des propriétés de la vapeur d'eau, de l'évaporation et de la condensation (enjeu N2), nous effectuons l'analyse microscopique de trois phases (cf. les parties grisées dans le Tableau 11, p. 194).

- La phase de discussion (N22c) effectue la synthèse des explications imaginées par les élèves par rapport à la disparition de l'eau dans l'éprouvette qui vient d'être constatée par la classe ;
- La phase de discussion (N22g) effectue de nouveau la synthèse des explications des élèves à propos de la disparition de l'eau liquide mais, à ce stade, les élèves sont censés tenir compte du contenu du document de référence sur l'évaporation et la condensation qui vient d'être lu et commenté en collectif. Cette phase clôturera l'interprétation de la disparition de l'eau liquide.
- La phase (N24a) amène les élèves à catégoriser des objets / phénomènes de la vie quotidienne (nuages, buée, brouillard, etc.) sous l'état physique approprié de l'eau.

L'analyse de ces trois phases nous permet de retracer la dynamique de construction des savoirs relatifs à la vapeur d'eau, aux changements d'états qu'elle subit, et au traitement des objets ambigus (brouillard, nuages, etc.).

Avant de procéder à l'analyse microscopique de ces phases, nous questionnons le positionnement de la séquence observée par rapport aux documents institutionnels de référence.

8.3.3 Positionnement par rapport aux documents institutionnels de référence

On peut établir une connexion entre la nature des institutionnalisations ci-dessus et les parties suivantes des programmes d'enseignement de l'école primaire (2008), d'une part et des ressources pour l'école élémentaire (2012), d'autre part (cf. analyse plus détaillée du programme au paragraphe 3.1).

La matière
 L'eau : une ressource
 - états et changements d'état ;
 - le trajet de l'eau dans la nature ;
 - le maintien de sa qualité pour ses utilisations.
 L'air et les pollutions de l'air.
 Mélanges et solutions.

Figure 25 : Extrait du programme de l'école primaire (MEN, 2008a)

Cours élémentaire deuxième année	Cours moyen première année	Cours moyen deuxième année
États et changements d'état <ul style="list-style-type: none"> • Connaître les trois états physiques de l'eau. • Savoir que d'autres matières changent d'état. • Mettre en évidence les caractéristiques de différents états physiques observés. • Isoler des paramètres intervenant dans l'évaporation (température, surface libre, ventilation...). Vocabulaire : état physique, matière, solide, liquide, gazeux, ébullition, évaporation, vapeur, condensation, fusion, solidification, glace.	Mélanges et solutions <ul style="list-style-type: none"> • Distinguer deux types de mélanges : homogènes et hétérogènes. • Apprendre à séparer les constituants des mélanges par l'expérimentation. • Identifier les procédés permettant de séparer les constituants des mélanges homogènes et hétérogènes. • Connaître quelques caractéristiques des mélanges homogènes (conservation de la masse, saturation). 	Etats et changements d'état <ul style="list-style-type: none"> • Savoir que les changements d'état de l'eau se font à température fixe (0°C et 100°C sous la pression atmosphérique normale). • Découvrir qu'une masse d'eau solide occupe un volume plus important que la même masse d'eau liquide. Vocabulaire : vaporisation, liquéfaction, fusion, solidification. L'air et les pollutions de l'air <ul style="list-style-type: none"> • Identifier par l'expérimentation des propriétés qui

Figure 26 : Extrait des ressources pour l'école élémentaire (MEN, 2012)

Les programmes d'enseignement de l'école primaire (cf. Figure 25) évoquent uniquement l'eau, ainsi que les états et changements d'états associés. Les ressources pour l'école élémentaire (cf. Figure 26) donnent quelques indications supplémentaires : au-delà de « connaître les trois états physiques de l'eau », il s'agit de « mettre en évidence les

caractéristiques de [ces] différents états ». Un lexique donne la liste d'un vocabulaire relatif aux états et aux changements d'états, sans préciser son utilisation : les élèves sont-ils censés apprendre par cœur la définition de chacun de ces termes ? Doivent-ils seulement être capables de les employer dans une phrase ? Quant au phénomène d'évaporation, outre sa présence dans la liste de vocabulaire, il est évoqué dans l'optique d'« isoler les paramètres » qui influencent son déroulement (température, surface libre, ventilation...). La condensation n'est mentionnée qu'une seule fois et en dehors de tout contexte, dans la liste de vocabulaire. Notons que contrairement à sa formulation générale, « savoir que les changements d'état de l'eau se font à température fixe » ne s'applique ni pour l'évaporation ni pour la condensation, puisque ces phénomènes se déroulent à toutes les températures.

Au final, le discours officiel concernant les états de l'eau, l'évaporation et la condensation laisse une grande marge de manœuvre interprétative à l'enseignant. En particulier, il se limite presque à l'évocation des états (liquide, solide, gaz) et des changements d'état considérés (évaporation, condensation) et n'évoque pas les phénomènes naturels impliqués. L'enseignant est donc confronté aux questions suivantes : dans quels contextes étudier les phénomènes d'évaporation ou de condensation ? Faut-il recourir à des expérimentations, des manipulations ? Celles-ci doivent-elles être conçues spécifiquement pour la classe ou est-il possible de partir de phénomènes de la vie quotidienne ? Quel doit être leur rôle par rapport à la dynamique de construction des savoirs ? D'autre part, les documents officiels ne prescrivent pas d'ordre à l'enseignement des états et des changements d'états. Dans quel ordre amener ces deux notions ? L'enseignement des états est-il un préalable obligatoire à l'enseignement des changements d'état ?

Ces nombreuses interrogations, à la charge de l'enseignant, éclairent le choix de Louise d'utiliser une séquence déjà prête, dont la cohérence interne, l'efficacité et le lien avec les programmes est en principe assuré par les concepteurs de la ressource, compte-tenu de leur statut de personnes ressources pour l'enseignement des sciences désignées par l'institution.

8.4 Analyse microscopique des trois phases : N22c, N22g et N24a

8.4.1 Contextualisation de ces trois phases au sein de la séquence

Dans la classe étudiée, c'est la première fois de l'année scolaire que les élèves sont confrontés aux notions de vapeur d'eau, d'évaporation et de condensation. La référence commune relative à ces notions réside donc uniquement dans le début de la séquence observée : la présentation et la familiarisation au défi Grandsoif, d'une part et la mise en évidence du phénomène de disparition de l'eau liquide, d'autre part.

Lors de la présentation initiale du défi, Louise a demandé aux élèves d'imaginer un montage pour répondre au défi Grandsoif et a procédé au recueil des propositions correspondantes.

Retenons que deux grandes catégories d'idées émergent parmi les propositions de montage (cf. Figure 27). D'après la première, le sel s'évapore si l'eau est mise à chauffer. D'après la deuxième, il est possible de filtrer le sel de l'eau de mer à l'aide de coton, de charbon, de cailloux, d'une passoire ou bien d'un tee-shirt.

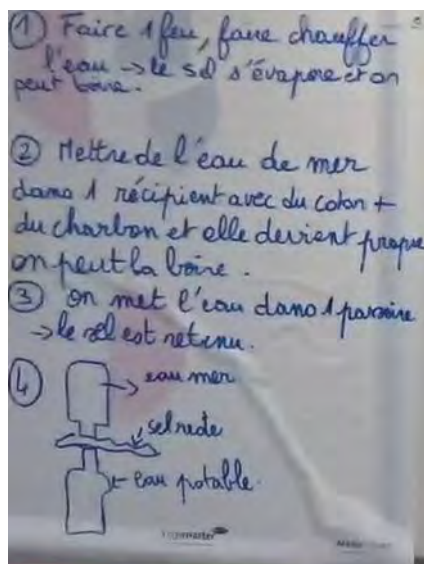


Figure 27 : Les propositions des élèves à propos du défi Grandsoif

Puis, Louise a demandé aux élèves de prévoir ce que devient l'eau quand on la laisse dans un récipient à l'air libre et de dessiner deux schémas représentant l'eau à une semaine d'intervalle.

L'enseignante a classé les propositions des élèves en deux catégories (cf. Figure 28) : ceux qui pensent que l'eau va rester au même niveau mais évoquent soit des modifications de température (l'eau deviendrait plus chaude, plus froide, etc.) soit des modifications d'aspect (des bulles apparaîtraient) et ceux qui défendent l'idée que le niveau de l'eau va baisser tout en attachant à ce phénomène deux termes différents (l'eau s'évapore ou l'eau fond). Une élève évoque la similarité de la disparition éventuelle de l'eau dans l'éprouvette avec celle des plaques d'eau. Sa remarque est reprise et diffusée par l'enseignante.

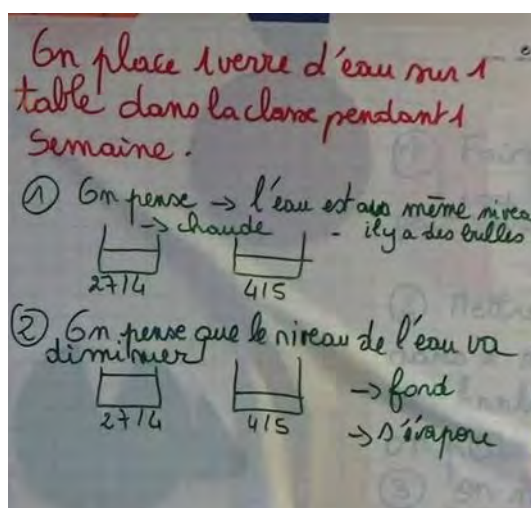


Figure 28 : Les prévisions des élèves sur le devenir de l'eau laissée à l'air libre

Louise place alors une éprouvette remplie d'eau en hauteur dans un coin de la classe. Le lendemain, la classe observe son comportement : le niveau de l'eau a effectivement baissé.

C'est à ce moment de la séquence que commence la première phase analysée. Mais avant, procédons à la seconde strate de l'analyse a priori : l'analyse de la situation définie par le milieu primitif dans lequel sont placés les élèves pour chacun des phases étudiées.

8.4.2 Analyse a priori du milieu primitif

La première phase analysée ci-dessous (N22c) correspond à la phase de discussion qui effectue la synthèse des explications imaginées par les élèves par rapport à la disparition de l'eau dans l'éprouvette. En effet, après constatation de la baisse du niveau de l'eau, Louise demande aux élèves de déterminer ce qu'est devenue, selon eux, l'eau disparue (cf. Figure 29).

Problème : Qu'est devenue l'eau qui n'est plus dans le verre ?
Mes propositions de réponse (j'écris ce que je pense) :
.....
.....

Figure 29 : Extrait de la feuille que les élèves ont à remplir en fournissant des explications relatives à l'eau disparue

Cette volonté de faire exprimer en amont, sans aucune référence commune disponible, les idées des élèves par rapport à certains phénomènes ou à certaines interprétations de phénomènes constitue une des spécificités de la séquence Grandsoif. Ainsi, avant cet événement, Louise avait déjà demandé aux élèves, par exemple, de prévoir ce qu'il advenait d'une quantité d'eau laissée à l'air libre pendant une semaine, ce qui avait abouti à la production de rapports aux objets divers et parfois contradictoires par les élèves (l'eau se réchauffe/refroidit, des bulles apparaissent, l'eau s'évapore/l'eau fond, etc.).

Dans les deux cas, il est possible d'argumenter que les conséquences de ces choix au niveau de l'action conjointe enseignant-élèves sont similaires. Elles résideront probablement dans :

- une multiplicité et une diversité de rapports aux objets construits par les élèves qui sont basés sur une interprétation naïve du phénomène en question et/ou très éloignés des enjeux de savoir visés par la séquence
- et partant de là, un défi important pour l'enseignante afin de s'appuyer sur ces rapports aux objets pour construire le savoir dans la classe.

En effet, le milieu primitif porte potentiellement des possibilités d'élargissement rapide : les élèves peuvent imaginer que l'eau liquide est absorbée par son support, qu'elle part dans l'air, dans le ciel, qu'elle garde ou change son identité (par exemple, qu'elle devient de l'air, du brouillard, etc.) À ce stade de la leçon, l'enseignante ne possède que peu d'arguments pour favoriser une explication au détriment d'une autre ; autrement dit, son espace de négociation des objets amenés par les élèves est restreint, par manque de référence partagée sur laquelle s'appuyer.

La situation change radicalement pour les deux autres phases analysées. La deuxième (N22g) correspond à la phase de discussion collective qui clôture l'interprétation de la disparition de l'eau et la troisième (N24a) correspond à l'institutionnalisation collective d'un lexique relatif aux états de l'eau dans lequel Louise demande aux élèves de situer des phénomènes de la vie quotidienne. Ces événements se situent tous les deux après l'introduction dans le milieu d'un

document de référence sur l'évaporation et la condensation qui a été lu, commenté et résumé en collectif (cf. Figure 30).

L'évaporation et la vapeur d'eau

Lorsqu'on laisse à l'air libre un récipient contenant de l'eau, au bout d'un certain temps, on constate que la quantité d'eau a diminué : l'eau s'est évaporée.

C'est le même phénomène qui se produit lorsque le linge sèche. L'eau qui imprègne le linge s'évapore.

Ce phénomène s'appelle l'**évaporation** de l'eau, il correspond à la transformation de l'eau liquide en vapeur d'eau.

La **vapeur d'eau** est de l'eau sous forme de gaz. Ce gaz est invisible et il n'a pas d'odeur.

La condensation

Lorsqu'un **nuage** (fines gouttelettes en suspension) ou de la **buée** (fines gouttelettes sur un support) apparaît, c'est la vapeur d'eau invisible contenue dans l'air qui s'est transformée en eau liquide.

Ce changement s'appelle la **condensation** de la vapeur d'eau.

La formation de ces fines gouttelettes se produit lorsque la vapeur d'eau est refroidie au contact d'air froid : formation d'un **nuage** ou d'un objet froid : formation de **buée**.

Figure 30 : Extrait du document de référence distribué aux élèves relatif à l'évaporation et la condensation

L'analyse de ce document montre qu'il dévoile de nombreux traits pertinents au sujet de l'évaporation et de la condensation, tant au niveau de la description des phénomènes eux-mêmes que des modèles qui les expliquent. Ainsi, à propos de l'évaporation, deux événements sont d'abord mentionnés : l'eau liquide qui disparaît d'un récipient et le linge qui sèche. Ces deux événements sont associés (« c'est le même phénomène qui se produit ») et un même champ lexical leur est associé (« s'est évaporée », « s'évapore », « l'évaporation de l'eau ») : selon le document, ils doivent nécessairement relever du même modèle explicatif. Celui-ci est développé à la fin du paragraphe : l'évaporation correspond à la transformation de l'eau liquide en vapeur d'eau, la vapeur d'eau constituant un gaz invisible et inodore. À propos de la condensation, deux phénomènes sont associés d'emblée (les nuages et la buée), au prétexte qu'ils feraient intervenir tous les deux des gouttelettes d'eau. Un même modèle explicatif leur est adjoint : c'est la vapeur d'eau contenue dans l'air qui s'est transformée en eau liquide. Un terme commun est censé recouvrir ces faits : la condensation. Finalement, les conditions d'existence du phénomène de condensation sont développées : il faut que la vapeur d'eau rencontre un objet plus froid qu'elle.

Par conséquent, les enjeux de savoir relatifs à l'évaporation et la condensation sont presque intégralement exposés dans ce document. On peut imaginer que ce texte est assez éloigné des rapports que les élèves peuvent avoir à l'objet « disparition de l'eau liquide » à partir de leurs expériences du quotidien. Il va falloir beaucoup d'ingéniosité de la part de l'enseignante :

- pour créer de la continuité entre le rapport initial à l'objet « disparition de l'eau liquide » construits par les élèves et le rapport à ce même objet développé par le document.
- pour que les deux tâches qu'elle propose par la suite (interpréter la disparition de l'eau liquide puis classer quelques phénomènes sous l'un ou l'autre des états de l'eau) ne se résument pas à un simple exercice de répétition d'une connaissance inerte prélevée du document et constituent un réel exercice de modélisation du réel.

8.4.3 Analyse de la phase N22c : les explications des élèves relatives à la disparition de l'eau liquide

À ce stade de la séquence, la classe a constaté collectivement que le niveau d'eau de l'éprouvette a diminué de quelques millilitres après qu'on l'ait laissé quelques jours à l'air libre. L'extrait commence au moment de la mise en commun qui suit une phase de travail individuelle dans laquelle Louise a demandé aux élèves de produire des explications qui éclairent ce qu'est devenue l'eau disparue.

Extrait L1 : Mise en commun des explications des élèves au sujet de la disparition de l'eau liquide

155. Ens: (à tous) allez/ alors on vous a demandé comme question qu'est devenue l'eau qui n'est plus dans l'éprouvette/ il manque deux millilitres/ où est-ce que c'est passé↑/ alors Farel qu'est-ce que tu penses/ tu expliques ton idée/ et ensuite les autres vous direz si vous êtes d'accord/ si vous avez mis à peu près la même chose/ ou vous complétez ou alors vous direz que non vous vous avez pensé à autre chose/ alors qu'est-ce que↑(...)
166. Far: l'eau qui était dans le verre a été évaporée avec la chaleur et avec/avec la chaleur elle est partie dans les sphères du verre
167. Ens: alors euh on comprend pas ce que ça veut dire
168. Elg: moi je suis d'accord avec lui
169. Ens: vas-y/ explique
170. Far: la sphère/ là y a des petits trous dans les verres
171. Ens: où y a des petits trous ↑
172. Far: mais si dans le plastique là
173. Ens: y a (va chercher l'éprouvette) à l'intérieur du verre enfin du du plastique là tu penses↑
174. Far : oui
175. Ens : donc ça veut dire que le récipient l'a/ l'a absorbé/ bon alors qu'est-ce que vous en pensez les autres↑/ il dit que elle s'est évaporée avec la chaleur et qu'ensuite elle est dans/ dans le récipient l'eau/ chut/ Younes pose ton cahier
176. You: elle a peut-être fondu ou elle s'est évaporée dans le ciel
177. Ens: alors// elle a fondu c'est-à-dire↑
178. You: avec la chaleur elle a fondu
179. Ens: et quand quelque chose fond/ il disparaît pas
180. Sof: non il disparaît pas
181. You : c'est le soleil qui prend l'eau
182. Ens: c'est le soleil qui prend l'eau/ c'est-à-dire↑
183. You: ben y a les rayons qui passent sur l'eau (xxx) ça chauffe/ après ben ça part
184. Ens: et on/ ce qu'on se demande c'est où est-ce que ça part/ oui ça a disparu mais où est-ce que ça a disparu/ chut/ on lève le doigt/
185. Cle : dans la terre
186. Ens : quelle terre↑/ tu vois de la terre là↑/ arrêtes de dire n'importe quoi Clément/ t'as le droit d'avoir ton avis mais là on parle de l'éprouvette/ de cette expérience-là alors arrête de dire n'importe quoi /(...)
qu'est-ce que tu voulais dire Aaron ↑
187. Aar: je suis pas d'accord avec quand ça fond/ parce que si ça fond on sait pas où ça fond/quand ça fond ça va rester dans l'eau et l'eau elle serait au même endroit / elle serait à la même
188. Ens: donc Aaron dit si quelque chose fond il reste au même endroit donc qu'est-ce que tu penses toi↑

189.Aar: *par exemple y a pas tout qui fond/ peut-être la glace/ mais après si la glace elle fond ça devient de l'eau/ donc ça reste encore dans l'eau/ donc ça ajoute encore plus [davantage] d'eau donc si*

190.Ens: *donc toi tu donnes des arguments pour dire que ce qui se passe c'est que c'est pas que ça fond/ lui il dit quand ça fond ça reste au même endroit sauf que ça change/ donc donc qu'est-ce que tu penses toi/ donne une explication d'un autre côté ↑ (...)*

191.Aar: *moi je pense que c'est l'évaporation mais je suis pas tout à fait d'accord avec Farel/ je crois pas que ça reste dans le plastique/ je pense que ça évapore dans l'air*

192.Ens: *donc y en a plusieurs qui m'ont mis ça/ qui est-ce qui m'a mis ça s'évapore ↑/ça part dans l'air/ y en a plusieurs qui ont mis ça/ oui alors qui est-ce qui peut expliquer un peu/ Younes*

193.Youn: *ça part dans les nuages*

194.Ens: *ça part dans les nuages// c'est-à-dire↑*

195.You: *ça crée les nuages*

196.Ens: *ça crée les nuages/ c'est ça que tu dis↑/(...)donc ça veut dire que on récapitule/ y en a qui pensent que l'eau elle s'évapore/ pas mal d'entre vous ont dit qu'elle s'évapore par rapport à la chaleur/ au soleil/ quelque chose comme ça/ d'ailleurs vous aviez dit qu'on pourrait faire un feu[à propos du défi Gransoif] et y en a plein qui m'ont dit soit dans le ciel/ soit dans l'air et là Younes dit dans les nuages et euh l'autre Younès dit en fait c'est pas que l'eau part dans les nuages c'est qu'elle crée les nuages/alors qu'est-ce que vous pensez de ça↑ (...)*

Extrait L1 : Mise en commun des explications des élèves au sujet de la disparition de l'eau liquide – S2 [(0:19:00) -(0:25:00)]

Analyse [mésoto/chrono/génèse]

La mésogénèse est essentiellement nourrie par les interventions des élèves qui introduisent des objets nouveaux et des reformulations ou demandes de clarification de la part de Louise.

Dans le cours de l'action, on voit apparaître des objets relatifs à la disparition de l'eau liquide de l'éprouvette et qui constituent des tentatives d'explication du phénomène du point de vue des élèves :

- Selon Farel, l'eau a « été évaporée » (TdP 166) ; elle est « partie dans les sphères du verre » (TdP 166), dans « les petits trous du verre » (TdP 170) ; Louise complète cette proposition à travers l'objet « le récipient l'a absorbée » (TdP 175).
- Selon Younès, l'eau « a fondu avec la chaleur » et « c'est le Soleil qui prend l'eau » (TdP 176, 178, 181).
- Selon Clément, l'eau est partie « dans la terre » (TdP 185).
- Selon plusieurs élèves, l'eau s'est évaporée et elle est partie vers un autre endroit (ciel, nuages, air, etc.) (TdP 191, 193, 196). L'eau est allée créer les nuages (TdP 195).

Au cours de cet extrait, Louise se maintient dans une position topogénétique basse caractérisée par un accompagnement distancié des propositions d'élèves. Cet accompagnement procède par des échos (« alors elle a fondu, c'est-à-dire ? », TdP 177) ; des reformulations (« ça veut dire que le récipient l'a absorbée », TdP 175) ; des regroupements de propositions similaires (« y'en a plusieurs qui ont mis ça, TdP 192) et des demandes d'approfondissement (« qui peut expliquer un peu ? », TdP 192). Globalement, l'enseignante ne s'engage pas dans l'évaluation de la pertinence des objets introduits par les élèves, par rapport au phénomène étudié.

Cependant, Louise se permet d'injecter quelques objets significatifs dans le milieu : elle recadre les échanges en interrogeant sur l'emplacement de l'eau disparue (« où l'eau a-t-elle disparu ? », TdP 184) et non sur son devenir. D'autre part, elle écarte d'emblée l'objet « l'eau est partie dans la terre » (TP 186), en pointant une contradiction entre l'eau dans l'éprouvette et l'absence de terre dans l'expérience. Ces deux exceptions lui donnent l'occasion d'assumer

une position de surplomb très ponctuelle. Mais de façon générale, les techniques topogénétiques déployées contribuent à la suspension du jugement de la part de l'enseignante. La topogénèse est caractérisée par une part de responsabilité importante pour les élèves. On peut alors constater que certains élèves sont en mesure de prendre des positions sur les rapports aux objets établis par leurs pairs :

- Aaron s'oppose à l'argument de Younes (« je suis pas d'accord avec quand ça fond », TP 187). Il propose un raisonnement pour soutenir son opposition : « quand ça fond ça va rester... l'eau elle serait au même endroit », TdP 187) qu'il explicite en prenant l'exemple de la fonte des glaçons (« ça reste dans l'eau, ça ajoute encore plus [davantage] d'eau », TdP 189). Aaron pointe la contradiction entre une « fonte » de l'eau liquide qui serait reliée à sa disparition (tel qu'appréhendée par Younes) et une fonte du glaçon qui rajoute au contraire de l'eau liquide dans le contenant.
- Aaron s'oppose à Farel (« je crois pas que ça reste dans le plastique, je pense que ça s'évapore dans l'air », TP 191)

La chronogénèse n'évolue pas car les tentatives de contradiction restent peu étayées et l'enseignante ne se positionne pas en faveur d'un argument plutôt qu'un autre.

Nous continuons notre analyse de cette phase en présentant l'extrait suivant, qui se déroule à la suite du précédent et qui donne une place importante à une nouvelle tentative d'expliquer la disparition de l'eau liquide : celle-ci serait devenue de la buée.

Extrait L2 : Une explication particulière : l'eau liquide devient de la buée

198. Ens : *donc Wissem*↑
 199. Wis: *je pense que ça devient de la buée*
 200. Ens: *ça devient de la buée [alors*
 201. Sof: *[ah oui il a raison il a raison*
 202. Ens: *qu'est-ce que c'est la buée*↑/ *explique pour toi qu'est-ce que c'est la buée*
 203. Wis: *j'arrive pas à expliquer trop mais je vais tenter/c'est comme du brouillard et c'est quand tu verses de l'eau chaude/ ben y a de la buée qui sort*
 204. Aar: *(xxx) la buée par exemple pour moi c'est/ c'est par exemple c'est y a de la chaleur mais c'est quand c'est encore plus chaud que ça reste quelque part et ça te/ ça t'empêches (xxx)/ c'est comme dans les lunettes quand (xxx)*
 205. Ens: *ah oui on a de la buée dans les lunettes/ toi Dorsaf qui a des lunettes/ quand est-ce que t'as de la buée sur tes lunettes*↑ (...)
 206. Dor: *c'est par exemple quand y a du brouillard ou quand je rentre/ par exemple quand quelqu'un se douche/ parfois je rentre dans la douche et y a de la buée qui rentre*
 207. Ens: *oui/ alors pourquoi/ donc quand tu as de la buée sur tes lunettes en sortant de la douche pourquoi à ton avis*↑
 208. Dor: *parce que/ parce que la température elle est chaude parce qu'on se douche avec de l'eau chaude*
 209. Ens: *ouais*
 210. Dor: *y a de l'eau chaude/ mais après la buée/ la buée elle est dans*
 211. Ens: *elle vient se coller sur les lunettes mais aussi où souvent*↑
 212. Els: *sur les miroirs*
 213. Ens: *sur les miroirs/bon ben faudra qu'on voit comment ça se fait*
 214. Sof: *aussi maîtresse/ ce qui est bizarre je suis pas d'accord avec Aaron et Dorsaf/parce que la buée c'est pas tout le temps chaude/ parce que nous à la patinoire [(xxx)*
 215. Ens: *[t'écoutes Wissem/ écoute Sofiane il répond à une partie de ce que tu as dit/ il dit quand on va à la patinoire*

216.*Sof: eh ben même quand il fait froid on fait/ même quand on fait aaah (expire) même quand on fait contre une vitre aaah (expire) y a quand même de la buée mais notre salive elle est pas bouillante/ [et puis même quand il pleut / tu laisses la pluie sur le pare-brise et y a de la buée*

217.*Ens: alors Dorsaf te réponds*

218.*Dor: en fait dans le corps on fait trente-sept degrés /et c'est normal que notre bouche elle est chaude puisqu'elle fait 37 degrés*

219.*Ens: donc en fait l'air il vient que notre corps qui est à trente-sept degrés donc c'est plus chaud que l'extérieur/où est-ce que on pourrait regarder pour avoir des réponses par rapport à cette évaporation↑/ à la vapeur et tout ça/ on a des idées mais maintenant il faudrait qu'on sache un peu plus/(...) où est-ce qu'on va aller voir↑*

220.*El: à la météo*

221.*Ens: où est-ce qu'on va aller voir pour savoir ce que c'est la vapeur/ l'évaporation↑///dans les documentaires/ donc en fait je vous ai photocopié des documentaires qui expliquent un petit peu ces phénomènes donc on va commencer à les lire*

Extrait L2 : Une explication particulière : l'eau liquide devient de la buée – S2 [(0:25:00) -(0:28:00)]

Analyse [mésoto/ topo/ chronogénèse]

Comme précédemment, la mésogénèse est essentiellement nourrie par les interventions des élèves qui introduisent des objets nouveaux et des reformulations ou demandes de clarification de la part de Louise.

Selon Wissem, l'eau liquide qui a disparu « devient de la buée » (TdP 198). À partir de l'introduction de cet objet dans le milieu, Louise oriente la discussion sur la buée, sur ses lieux de dépôt et sur ses conditions de production, tout en conservant une position topogénétique d'accompagnement pendant que les élèves développent leurs idées sur ces thématiques.

- Wissem affirme que la buée, « c'est comme du brouillard » (TdP 203) et qu'elle apparaît « quand tu verses de l'eau chaude » (TdP 203)
- Aaron évoque « les lunettes » comme lieu de dépôt de la buée (TdP 204).
- Dorsaf évoque également « la douche » comme lieu de dépôt de la buée et, comme Wissem, associe la présence « d'eau chaude » à son émergence (TdP 206, 208, 210).
- Plusieurs élèves mentionnent aussi les miroirs comme lieu de dépôt de la buée (TdP 212, 213).

L'accompagnement de Louise procède par des échos (« ça devient de la buée, alors ? », TdP 200) ; des désignations d'élèves ayant des caractéristiques spécifiques (« toi Dorsaf qui a des lunettes, quand est-ce que t'as de la buée sur tes lunettes ? », TdP 205) ; des demandes d'approfondissement (« explique pour toi qu'est-ce que c'est la buée », TdP 202) et des mises en tension de propositions contradictoires (« écoute Sofiane, il répond à une partie de ce que tu as dit, il dit quand on va à la patinoire... », TdP 215). Globalement, l'enseignante ne s'engage pas dans l'évaluation de la pertinence des objets introduits par les élèves. La topogénèse est alors caractérisée par une part de responsabilité importante pour les élèves. On peut alors constater que certains élèves sont en mesure de prendre des positions sur les rapports aux objets établis par leurs pairs :

- Sofiane intervient pour s'opposer à l'idée que la chaleur est à la source de la production de buée, idée développée par Dorsaf et Wissem. Il avance trois arguments : « à la patinoire » (TdP 214), « quand il fait froid » (TdP 216), il est possible de créer de la buée

en expirant (fait « aaah », TdP 216). De plus, il est possible de produire de la buée en expirant « contre une vitre » alors que « notre salive n'est pas bouillante » (TdP 216). Enfin, « la pluie sur le pare-brise » forme de « la buée » (TdP 216).

- Dorsaf réplique en avançant l'idée que « notre bouche est chaude » puisqu'elle est à la température de notre corps, c'est-à-dire « trente-sept degrés » (TdP 218). Louise valide cet objet et confirme que « c'est plus chaud que l'extérieur » (TdP 219).

Mises à part des micro-institutionnalisations au sujet de la buée, la majeure partie des objets ci-dessus (en particulier, le fait que la disparition de l'eau liquide engendre de la buée) n'est ni confirmée ni invalidée : les objets restent en suspens, par absence de jugement de l'enseignante sur leur pertinence. La chronogenèse continue donc de stagner jusqu'à la fin de la discussion collective.

En toute fin d'extrait, l'enseignante bascule dans une position topogénétique haute : elle ré-orienté la discussion sur le débat concernant le devenir de l'eau liquide disparue et sollicite les élèves sur la façon de départager l'ensemble des propositions avancées jusque-là (TdP 219). Elle invalide le seul objet qui émerge dans le milieu en réponse à sa question (« à la météo », TdP 220-221) puis elle formule elle-même la règle d'action pertinente : il convient de se reporter à la lecture de « documentaires scientifiques » (TdP 221).

Ce dernier geste vient redéfinir profondément l'orientation de l'action des élèves et de l'enseignante : il ne s'agit plus d'explorer ses propres idées, mais de chercher une aide extérieure. Il constitue la prémisse d'une avancée majeure des savoirs : l'exploration du document scientifique de référence est sur le point d'introduire de nombreux objets inédits dans le milieu. Nous revenons sur ce point dans la synthèse ci-dessous.

Interprétation et synthèse des différents extraits de la discussion collective relative à la disparition de l'eau liquide

Cet exercice de production d'explications peut être considéré comme un exercice de modélisation, dans le sens où il s'agit de créer une connexion entre un phénomène observé (la disparition de l'eau liquide) et un modèle interprétatif.

Les élèves témoignent d'une diversité de rapports à l'objet « disparition de l'eau liquide dans l'éprouvette ». Il est possible de les catégoriser de la manière suivante :

- les rapports dans lesquels les élèves étiquettent le phénomène de disparition de l'eau liquide : « l'eau s'évapore » ou « l'eau fond », sans qu'intervienne réellement de modèle interprétatif ;
- les rapports dans lesquels les élèves se concentrent sur un lieu supposé de la présence de l'eau : « l'eau est partie dans la terre », « dans les nuages », « dans l'air », « dans le ciel ». La production de ce type d'objets est encouragée par les propos de l'enseignante dont la consigne orale effectue un virage par rapport à la consigne de la feuille écrite puisqu'elle demande aux élèves de déterminer « où l'eau a-t-elle disparu » (ce qui incite à se focaliser sur un endroit particulier de l'espace) et non pas « ce que l'eau est devenue » (ce qui aurait pu inciter à s'interroger sur le changement de nature qu'elle subit). D'autre part, ces

rapports à l'objet « disparition de l'eau liquide » peuvent être mis en correspondance avec les représentations scolaires classiques du cycle de l'eau, dans lesquelles l'évaporation est symbolisée par une flèche ascendante qui part des étendues d'eau terrestres et pointe vers le ciel, comme montré dans l'analyse a priori (cf 8.4.2) ;

- les rapports dans lesquels les élèves proposent un mécanisme explicatif à la disparition de l'eau liquide et qui témoignent d'un effort d'imagination conséquent face au problème considéré : « le plastique contient des petits trous dans lesquels l'eau peut se loger, ce qui veut dire que l'eau liquide a été absorbée », « l'eau se transforme en buée ».

Aucun des rapports à l'objet « disparition de l'eau liquide dans l'éprouvette » ne se superpose au point de vue scientifique sur la question. Ce n'est en rien étonnant puisque, dans la mesure où les élèves naviguent dans une situation dénuée de référence déjà-partagée à propos de l'évaporation, les objets portés par les élèves ne peuvent qu'être issus des rapports qu'ils ont établis préalablement à des situations de « disparition d'eau » dans la vie quotidienne. Ils relèvent d'une conception « familière » du phénomène d'évaporation : il est évident que même les objets « l'eau s'évapore » ou « l'eau est partie dans l'air », qui partagent un air de famille avec le point de vue scientifique, ne sont pas équivalentes à « l'eau change d'état et se transforme en vapeur d'eau » ou « l'air contient de la vapeur d'eau ». Globalement, il convient de remarquer l'absence de toute référence à la vapeur d'eau ou à un changement d'état (ou de nature) de l'eau.

Au niveau topogénétique, les gestes de l'enseignante contribuent à mettre en place une dévolution importante : il s'agit d'accueillir et de recenser la diversité des propositions produites par les élèves et éventuellement, de regrouper celles qu'elle juge similaires. Elle démontre, d'autre part, une habileté particulière pour faire réagir les élèves sur les propositions des autres : pensons à Aaron qui réponds à Younes en pointant lui-même la contradiction entre deux usages d'un même terme (« ça fond ») quand on l'applique à deux situations opposées (l'ajout d'eau liquide lors de la fonte du glaçon et la disparition d'eau liquide lors de l'évaporation) ou à Dorsaf qui réplique à Sofiane que la buée produite en soufflant dans une patinoire provient du corps, qui est bien à une température plus haute que son environnement. En résumé, l'enseignante adopte une position d'accompagnement et de suspension du jugement, tout en parvenant à faire amorcer un dialogue entre les élèves à propos des objets de savoirs.

Au niveau de la dynamique de l'avancée des savoirs, mises à part quelques rapports aux objets anecdotiques institutionnalisés par l'enseignante, les différentes propositions qui tentent d'expliquer ce que devient l'eau disparue sont simplement accolées, sans jugement particulier sur leur validité. La seule structuration marquante du milieu provient de la règle d'action proposée par Louise en toute fin d'extrait : il s'agit du recours à des moyens externes à la classe (les documentaires scientifiques) pour trancher entre toutes les propositions avancées. Dans la séquence du « défi Grandsoif », il est conseillé à l'enseignant au moment de cette phase de synthèse collective de « mettre en commun les hypothèses, d'animer les échanges et d'amener les élèves à choisir la méthode d'investigation adaptée, [c'est-à-dire] la documentation ». Il est

intéressant de remarquer, que contrairement à ce que prétend le document, il ne suffit pas de mettre les élèves devant la diversité des explications relatives à la disparition de l'eau liquide pour qu'ils choisissent spontanément la « méthode d'investigation » que la séquence « Grandsoif » veut leur imposer (les documentaires scientifiques). C'est d'ailleurs après un silence persistant des élèves que l'enseignante a été contrainte d'injecter cette idée dans le milieu.

À ce stade, il semble pertinent de s'interroger sur le destin des propositions principales des élèves dans la suite de la séquence : quelle(s) place(s) trouvent les propositions : « l'eau a fondu », « l'eau est partie dans les nuages », « l'eau a été absorbée par son support », « l'eau s'est transformée en buée » dans le reste de la dynamique de construction des savoirs ?

Comme annoncé par l'enseignante, la suite immédiate consiste en l'exploration du documentaire scientifique de référence. L'analyse de ce document, effectuée plus haut (cf. 8.4.2) a montré qu'il dévoile beaucoup de traits pertinents au sujet de l'évaporation, tant au niveau des phénomènes eux-mêmes que du modèle qui les explique et des liens entre modèles et observables. Ainsi, il est affirmé que l'eau liquide qui disparaît d'un récipient s'évapore et que l'évaporation correspond à la transformation de l'eau liquide en vapeur d'eau, la vapeur d'eau constituant un gaz invisible et inodore. Il est également précisé que la buée et les nuages sont faits de gouttelettes d'eau et que ces phénomènes sont issus de la condensation de la vapeur d'eau environnante et apparaissent grâce à une différence de température entre la vapeur et son environnement. Sans entrer dans une analyse détaillée de l'action conjointe du moment d'exploration du document scientifique, deux remarques générales peuvent en être dégagées :

- Lors de la lecture collective et des commentaires sur ce document, très peu d'interactions enseignante - élèves reviennent sur les propositions non attendues ou incorrectes du point de vue scientifique : tout au plus l'enseignant évoque-t-elle qu'« on sait maintenant que l'eau ne fond pas », mais sans justification autre que le recours direct au documentaire. Les différentes propositions ont donc simplement été accolées dans la discussion puis n'ont pas été intégrées à la dynamique de co-construction des savoirs. Nous défendons l'idée qu'il existe des raisons spécifiques, d'ordre épistémologique, didactique ou liées aux contraintes pratiques de la classe, derrière la difficulté à prendre en compte les propositions initiales des élèves dans la construction des savoirs : par exemple, comment trouver des arguments qui s'opposent aux idées issues d'un savoir familier (« ça fond ») alors que cet usage naïf est peut-être largement suffisant pour décrire les transformations de l'eau dans le milieu d'origine de l'élève ? Comment s'opposer à l'idée que le support a absorbé l'eau liquide sans refaire l'expérience dans d'autres conditions (en utilisant d'autres matériaux ou d'autres liquides), expériences chronophages et coûteuses ? Dans un tel cas, l'espace de négociation des rapports aux objets introduits par les élèves est si restreint que, pour faire avancer le savoir, Louise n'a pas d'autres recours que l'usage d'un surplomb massif à travers l'utilisation du document scientifique de référence.
- Au final, les élèves qui ont eu l'opportunité de diffuser largement leurs rapports aux objets « disparition de l'eau liquide », « buée », etc. dans le collectif, encouragés en cela par la position topogénétique d'accompagnement de l'enseignante, voient se refermer sur eux

les contraintes du modèle théorique visé : il existe une discontinuité majeure entre les rapports que les élèves ont construits vis-à-vis de la disparition de l'eau dans l'éprouvette et ce qu'en dit le document de référence. Par exemple, Younès qui défendait l'idée que l'évaporation de l'eau équivalait à son absorption par les petits trous du plastique de l'éprouvette ou bien Wissem qui pensait que l'eau devenait de la buée doivent subitement se conformer à une autre idée de l'évaporation, qui se fonde des notions plus abstraites, telles une nouvelle forme d'eau imperceptible (« la vapeur d'eau ») et un changement d'état (c'est-à-dire de forme) de l'eau.

8.4.4 Analyse de la phase N22g : l'interprétation de la disparition de l'eau liquide en termes de changement d'état

Juste après l'exploration du document scientifique de référence, Louise demande de nouveau aux élèves d'expliquer individuellement la disparition de l'eau liquide de l'éprouvette, mais de manière « scientifique » cette fois. L'extrait commence au moment de la mise en commun qui suit cette phase de travail individuelle.

Extrait L3 : Les élèves s'emparent de l'idée que l'eau liquide s'est transformée en vapeur d'eau

416. *Ens : allez/on va essayer de voir ensemble ce que vous avez trouvé(...)/ ok/ donc// maintenant qu'on a lu les documents/ comment vous pouvez expliquer un peu plus scientifiquement ce qu'est devenue l'eau qui a disparu dans notre éprouvette/(...) alors Younes ↑*
417. *You: elle s'est évaporée*
418. *Ens: elle s'est évaporée /là-dessus on est tous d'accord mais ça ne me suffit pas/ moi je veux savoir qu'est-ce que ça veut dire s'évaporer*
419. *Wis: moi je sais*
420. *Ens: Wissem↑*
421. *Wis: c'est de/ c'est l'évaporation/ c'est de l'eau/c'est de l'eau/ qui se transforme en vapeur*
422. *Ens: (Ens écrit sur l'affiche) d'accord/ donc on est d'accord (...)/ ça veut dire quoi l'eau qui est devenue de la vapeur↑/ euh/ Younes tu poses ton stylo/ je veux pas que tu recopies/ c'est bon/ Marwah ça veut dire quoi l'eau qui est devenue de la vapeur/ on est tous d'accord l'eau s'est évaporée/ on l'a lu dans le document/ seulement s'est évaporée ça veut dire quoi↑/ Wissem nous dit ben elle est devenue de la vapeur/ mais c'est quoi la vapeur↑*
423. *Mar: c'est quand l'eau elle baisse un peu*
424. *Ens: l'eau elle a/ alors ça tu expliques pourquoi/ y a moins d'eau/ l'eau a baissé un peu/ Wissem et les autres me disent/ ben oui elle s'est évaporée/ elle est devenue de la vapeur(...)/mais c'est quoi de la vapeur↑*
425. *Mar: c'est/ c'est quand l'eau elle tombe*
426. *Ens: quand l'eau elle tombe moi j'appelle ça de la pluie*
427. *Mar: non mais pas de la pluie quand on avait parlé du linge*
428. *Ens: ah quand le linge sèche/ l'eau elle s'évapore aussi/ d'accord elle peut s'évaporer dans un verre/ elle peut s'évaporer sur le linge mais ça m'explique pas ce que c'est la vapeur/*
429. *Mar: parce que l'eau elle sèche*
430. *Ens : mais l'eau elle sèche d'accord mais qu'est-ce qu'elle est devenue↑/ le/ est-ce que tu retrouves/ à part si t'as pas essoré ton linge mais quand tu sors le linge de la machine à laver il est essoré/ il est pas trempé/ t'as pas des flaques d'eau par terre/ donc qu'est-ce qu'est devenue l'eau qui était dans le linge↑*
431. *Elg: ben elle est partie*
432. *Ens: vas-y*
433. *Tay: je peux aller là ↑ (désigne l'avant de la classe)*
434. *Ens: non tu peux le dire là/ écoute Tayson (à Yassine)*
435. *Tay: eh ben en fait je vais expliquer comment ça se fait que c'est arrivé/ en fait dans le verre y avait de la vapeur/après la vapeur c'est devenu/ du gaz après ça s'est envolé/ et après ça fait moins d'eau dans le verre/ après le gaz c'est parti dans l'air/ après c'est parti euh*
436. *Ens: et on le voit pas pourquoi↑*

- 437.Sab: *parce qu'elle a pas d'odeur et elle est invisible*
- 438.Elg: *c'est écrit dans le document*
- 439.Ens: *donc l'eau s'est évaporée (l'écrit)*
- 440.Elg: *on l'écrit ça maîtresse↑*
- 441.Ens: *non on va l'écrire plus tard/ donc on est d'accord sur l'eau s'est évaporée/ elle est devenue de la vapeur/ il nous dit Tayson// la vapeur c'est du gaz donc est-ce que la vapeur d'eau qui est un gaz c'est la même chose que l'eau↑/ est-ce que c'est de l'eau↑*
- 442.Els: *non c'est du gaz*
- 443.Ens: *donc*
- 444.Wis: *oui c'est de l'eau*
- 445.Ens: *alors Wissem il pense que c'est de l'eau*
- 446.Wis: *c'est de l'eau qui s'évapore*
- 447.Ens: *c'est de l'eau qui s'est transformée en gaz/ est-ce que un glaçon c'est de l'eau↑*
- 448.Els: *oui*
- 449.Ens: *oui mais c'est de l'eau qui s'est transformée*
- 450.Els: *en glaçon*
- 451.Ens: *en glace/ d'accord*
- 452.Wis: *c'est de l'eau mais ce n'est pas de l'eau liquide*
- 453.Ens: *exactement/ la glace/ c'est de l'eau mais c'est pas de l'eau liquide/ c'est de l'eau↑*
- 454.Els : *solide*
- 455.Ens : *solide/ la vapeur d'eau c'est de l'eau mais c'est de l'eau↑*
- 456.Els: *gazeuse /évaporée*
- 457.Ens: *gazeuse enfin/ en forme de gaz/ d'accord/ c'est quand même bizarre hein de se dire que la vapeur d'eau c'est de l'eau mais sous une autre forme/ sous forme de gaz/ donc ensuite ben une autre/ une autre forme ça peut être soit de la glace/ soit de l'eau liquide/ soit de la vapeur d'eau/ donc (écrit) elle est devenue/ elle est devenue/ elle est devenue/ elle est devenue [critique la répétition de l'expression au tableau]/ l'eau s'est évaporée elle est devenue de la vapeur/elle est maintenant du gaz*
- 458.Wis: *moi j'ai marqué du gaz invisible [lors du travail individuel] et qui n'a pas d'odeur*
- 459.Ens: *exactement c'est pour ça qu'on le voit pas/ d'accord/ maintenant juste oui Wissem↑*
- 460.Wis: *mais en fait comme ça se voit pas/ je propose de mettre le verre à côté de la fenêtre*
- 461.Ens: *et↑*
- 462.Wis: *comme ça on verra s'il y a de la vapeur/ euh de la buée*
- 463.Ens: *ah donc tu voudrais que la vapeur se transforme en buée/ pour qu'on puisse la voir/ ben oui et dans quelles conditions ça marcherait↑/ quand est-ce que ça marche↑*
- 464.Aar: *en hiver par exemple*
- 465.Wis : *le matin ou la nuit*
- 466.Ens: *voilà ça marcherait si l'eau/ si la vitre était froide donc peut être que la nuit comme la température baisse ça pourrait se voir mais après le problème c'est que la journée il fait pas assez froid/ mais ça serait une expérience pour voir la vapeur d'eau*

Extrait L3 : Les élèves s'emparent de l'idée que l'eau liquide s'est transformée en vapeur d'eau – S3 [(0:37:00) -(0:43:00)]

Analyse [méso/topo/chronogène]

Au début de l'extrait, Louise ouvre un espace de négociation des rapports à l'objet « disparition de l'eau de l'éprouvette » en encourageant les élèves à expliquer « scientifiquement ce qu'est devenue l'eau » (TdP 416) avec l'appui du documentaire scientifique préalablement lu.

La mésogénèse se construit alors à partir des interventions des élèves qui introduisent des objets relatifs à la disparition de l'eau liquide, et à l'interprétation de cette observable en termes de vapeur d'eau.

Selon Younès, l'eau « s'est évaporée » (TdP 417). Louise pointe l'insuffisance de ce rapport à l'objet « disparition de l'eau liquide » (TdP 416) et demande des approfondissements.

Selon Wissem, l'évaporation correspond « à de l'eau qui se transforme en vapeur » (TdP 421). En prenant en note au tableau cet énoncé, l'enseignante désigne comme pertinent ce rapport à l'objet « évaporation » et ré-orienté la discussion sur la nature de la vapeur d'eau (TdP 422).

La réponse de Marwah consiste à mentionner la baisse du niveau de l'eau dans l'éprouvette (TdP 423) et le séchage du linge (TdP 425, 427). Louise confirme qu'il s'agit de deux situations d'évaporation mais de nouveau, recentre les échanges sur la nature de la vapeur d'eau (TdP 428)

Selon Tayson, il y avait « de la vapeur dans le verre » qui est « devenu du gaz », qui « s'est envolé » et « est parti dans l'air » d'où le fait qu'il y ait « moins d'eau dans le verre » (TdP 435). Selon Sabri, il est impossible de voir la vapeur car « elle n'a pas d'odeur et est invisible » (TdP 436-437).

Louise ré-orienté alors la discussion en demandant aux élèves si la vapeur constitue encore de l'eau (TdP 442). Plusieurs élèves dévoilent leur rapport à l'objet « vapeur d'eau » en affirmant qu'il s'agit de gaz, et non plus d'eau (TdP 442). Wissem, au contraire, défend que l'eau garde son identité à travers sa transformation : la vapeur, c'est « de l'eau qui s'évapore » (TdP 444, 446). L'enseignante développe alors une analogie avec la solidification de l'eau avec l'appui de Wissem. Elle injecte plusieurs objets significatifs dans le milieu (TdP 447-457) : puisqu'un glaçon est bien de l'eau mais à l'état solide (« c'est de l'eau mais ce n'est pas de l'eau liquide », confirme Wissem en écho au TdP 452), alors la vapeur est encore de l'eau mais sous l'état gazeux. Louise concède cependant l'étrangeté de considérer la vapeur comme de l'eau : « c'est quand même bizarre hein de se dire que la vapeur d'eau c'est de l'eau mais sous une autre forme » (TdP 457).

La discussion se clôture par une intervention de Wissem qui propose de placer l'éprouvette à côté de la fenêtre pour faire apparaître de la buée et rendre visible la vapeur d'eau produite (TdP 460-462). Louise accepte le principe et les conclusions de l'expérience, ce qui revient à admettre comme pertinents les rapports aux objets « vapeur » et « buée » qui y sont développés. Elle négocie cependant certains aspects de l'expérience : Aaron propose de la faire « en hiver » (Td 464) et Wissem « la nuit » (TdP 465). Louise désigne comme pertinentes ces nouvelles conditions et décante leur racine commune : « ça marcherait si la vitre était froide » (TdP 466).

Dans cet extrait comme dans les précédents, l'enseignante prend une position basse d'accompagnement en acceptant que les propositions des élèves aient une existence dans le milieu, comme par exemple lorsque Tayson développe son idée de « l'envol » de la vapeur d'eau dans l'air ou que Wissem propose de placer l'éprouvette près de la fenêtre afin d'obtenir de la buée. Les élèves trouvent ici aussi une occasion de diffuser leurs idées au niveau du collectif.

Cependant, contrairement aux extraits précédents, elle n'hésite pas à réorienter fermement la nature des objets proposés par les élèves : lorsque Marwah énumère les situations d'évaporation (le linge qui sèche, la baisse du niveau de l'eau de l'éprouvette), elle exclut ces objets du milieu et rappelle que ce qu'elle attend de cette discussion concerne la nature et les propriétés de la vapeur d'eau. De plus, elle bascule également dans une position topogénétique plus élevée pour développer l'idée que la vapeur est aussi de l'eau, au même titre que la glace ou l'eau liquide : l'argument analogique entre la solidification et l'évaporation est à son initiative. Toutefois, elle prend soin de valoriser en amont le point de vue de Wissem : tout au long de son raisonnement,

elle joue sur la formation d'une coalition avec Wissem face aux autres élèves et elle le sollicite comme appui à plusieurs reprises.

Au final, les positions topogénétiques que prend l'enseignante sont bien plus variées dans cette discussion que dans la précédente : position d'accompagnement lorsqu'il s'agit de recueillir et de reformuler les propositions des élèves, coalition lorsqu'elle utilise Wissem comme faire-valoir dans son raisonnement analogique, postulation mimétique quand elle admet qu'il est bien étrange que la vapeur invisible soit de l'eau au même titre que la glace, surplomb topogénétique lorsqu'il s'agit d'orienter la discussion sur certains traits pertinents et d'exclure ou valider certains rapports aux objets.

Après la discontinuité amenée par l'introduction du document scientifique qui introduisait une manière de conceptualiser l'évaporation très différente de ce que les élèves avaient pu produire auparavant, une forme de ralentissement chronogénétique est à l'œuvre dans cet extrait. La discussion collective sert à stabiliser certains énoncés cruciaux par rapport aux enjeux de savoir de la séquence. À la fin de la discussion, est institutionnalisée l'idée que l'eau liquide qui a disparu de l'éprouvette est devenue de la vapeur, nouvelle « forme d'eau », invisible et inodore, qui est sous l'état gazeux.

Interprétation et synthèse de la discussion collective relative à la disparition de l'eau liquide

La consigne donnée aux élèves est exactement similaire à celle de la tâche précédente : il s'agit de fournir des explications qui élucident la disparition de l'eau liquide. Comme précédemment, cet exercice de production d'explications peut être considéré comme un exercice de modélisation du réel, dans le sens où il s'agit de créer une connexion entre un phénomène observé (la disparition de l'eau liquide) et un modèle interprétatif. Il existe cependant une différence cruciale d'avec la tâche précédente. Les élèves disposent maintenant d'une référence commune sur le sujet : ils ont lu, commenté et analysé le document scientifique de référence. Autrement dit, le modèle des phénomènes d'évaporation et de condensation fait maintenant partie du milieu. L'enseignante encourage très clairement les élèves à dépasser leur point de vue naïf sur ces phénomènes en exprimant que ce qui est attendu à ce stade de la leçon a évolué depuis la tâche précédente (« comment vous pouvez expliquer un peu plus scientifiquement ce qu'est devenue l'eau disparue » TdP 416, « [l'eau] s'est évaporée/ là-dessus on est tous d'accord mais ça ne me suffit pas » TdP 418). Le contrat didactique s'est déplacé : il s'agit de se positionner de manière scientifique par rapport aux faits observés en se rapportant au contenu du document de référence et là aussi, l'enseignante exprime plusieurs fois cette idée (« maintenant qu'on a lu les documents » TdP 416, « on l'a lu dans le document », TdP 422). Les modélisations telles qu'elles sont présentées dans le document constituent les contraintes que les élèves doivent se donner pour ré-interpréter les observables, et de là satisfaire les attentes de l'enseignante dans la discussion.

Dans ces circonstances, examinons la nature des objets et des rapports aux objets principaux du milieu, les techniques topogénétiques de l'enseignante et l'avancée des savoirs.

Certains objets amenés par les élèves se superposent mot pour mot avec un extrait du document (par exemple, « l'eau s'est évaporée », « l'eau s'est transformée en vapeur d'eau »). Dans ce cas, les élèves qui les produisent font preuve d'une émancipation très limitée par rapport au document. L'enseignante le fait savoir en orientant la discussion sur d'autres enjeux (par exemple, la nature de la vapeur d'eau).

Certains objets témoignent de la construction (timide) de liens entre des éléments du modèle de l'évaporation tirés du document scientifique de référence et l'expérience concrète de disparition de l'eau liquide de l'éprouvette qui vient d'être faite en classe (par exemple, « on n'a pas vu la vapeur d'eau car cette substance est invisible », « la vapeur s'est envolée dans l'air d'où la baisse constatée du niveau de l'eau », etc.). D'autres objets témoignent de la construction (plus affirmée) de liens entre des éléments des modèles de l'évaporation et de la condensation et des expériences anticipées par les élèves. Lorsque Wissem propose de placer l'éprouvette près de la fenêtre pour « rendre visible » la vapeur en la transformant en buée sur la fenêtre, et qu'Aaron lui rétorque que cette expérience ne pourrait fonctionner qu'en hiver, ils mettent implicitement en action plusieurs composantes des modèles qu'ils appliquent à une situation imaginée.

Lorsque les élèves soumettent tous ces objets à l'enseignante, ils mettent à l'épreuve ce qu'ils ont compris des modèles par rapport à ce qu'ils viennent d'expérimenter ou ce qu'ils pourraient expérimenter. À travers cette négociation, les élèves recréent de la continuité entre leur expérience personnelle et la modélisation des phénomènes d'évaporation et de condensation telle qu'elle apparaît dans le document. On voit directement à l'œuvre se construire ou évoluer les rapports que certains élèves entretiennent vis-à-vis des objets « évaporation », « vapeur d'eau », « condensation », « buée », etc.

D'autres objets témoignent de la recherche de l'établissement du bien-fondé de certains éléments des modélisations présentés dans le document. Ainsi, pour défendre l'idée que l'identité de l'eau se maintient malgré son changement de forme, l'enseignante utilise une analogie avec la solidification. Nous avons souligné plus haut (cf. 6.2) que la réversibilité de l'expérience vécue lorsque l'eau solide devient liquide (et inversement) emporte la conviction qu'il s'agit de la même substance chimique, en dépit de leurs propriétés apparemment dissemblables. Or, si on accepte que le produit de la solidification (la glace) soit de l'eau, on est obligé, par cohérence interne des modèles relatifs aux changements d'état de l'eau, d'accepter que le produit de l'évaporation (la vapeur) soit aussi de l'eau. C'est ce raisonnement que développe implicitement l'enseignante, appuyée par Wissem et qui assure la pertinence de l'existence de la vapeur d'eau comme nouvelle forme de l'eau. Ce geste permet, là aussi, de recréer de la continuité entre les modélisations du document (qui se fondent sur l'existence de la vapeur d'eau) et une référence externe à la classe mais supposée commune (la glace comme forme d'eau issue du changement d'état de l'eau liquide vers l'eau solide).

Nous avons montré combien les modélisations introduites dans le document scientifique de référence amenaient une rupture avec les façons de penser la disparition de l'eau liquide par les élèves. En les forçant à revisiter ce phénomène avec les outils du document, les élèves recréent de la continuité entre leur expérience personnelle (ce qu'ils ont perçu de la disparition de l'eau

liquide, mais aussi ce qu'ils connaissent de la glace en tant qu'état de l'eau, comment ils imaginent créer de la buée à partir de la vapeur, etc.) et les modélisations de l'évaporation et de la condensation.

Une nuance reste cependant à apporter : la tâche suit tellement de près le document que certains élèves se contentent de répéter ce qu'il y est écrit. Il faut toute l'ingéniosité de l'enseignante à travers l'acuité de ses relances (« ça m'explique pas ce qu'est la vapeur », « pourquoi est-ce qu'on ne voit pas [la vapeur] », « est-ce que la vapeur qui est un gaz est [aussi] de l'eau ? ») et ses variations de posture topogénétiques pour que se déploient dans le milieu des objets qui laissent penser que certains élèves font preuve d'une utilisation des modèles qui outrepassent la récitation « mécanique » du document.

8.4.5 Analyse de la phase N24a : la catégorisation des objets de la vie quotidienne (nuage, buée, brouillard, etc.)

L'enseignante se propose, dans l'extrait significatif suivant qui se situe trois séances après les précédents, de résumer et d'institutionnaliser (par prise de notes sur le cahier de sciences) certaines des connaissances entrevues depuis le début de la séquence. En particulier, il s'agit de rappeler le nom des trois états de l'eau et de classifier certains phénomènes de la vie quotidienne sous l'un ou l'autre de ces états.

Extrait L4 : Élucidation de l'état physique de la buée et du brouillard

- 542.**Ens : on a dit/ que l'eau elle pouvait être sous di/ sous trois formes/on va lever le doigt Aaron parce que je sais que tu sais mais y a pas que toi donc j'aimerais bien qu'il y en ait d'autres/ Emmanuel/ elle peut être sous forme de gaz/ comment ça s'appelle l'eau sous forme de gaz↑
- 543.**Emm: la vapeur
- 544.**Ens: la vapeur d'eau/d'accord/ elle peut être aussi↑
- 545.**Yas: solide
- 546.**Ens: solide/ c'est↑
- 547.**Yas: un glaçon
- 548.**Ens: c'est la glace d'accord
- 549.**El :: et le liquide
- 550.**Ens: et le liquide/ c'est/ voilà/ donc on va le marquer/ on appelle ça/ les états de l'eau/ y a trois sortes d'états/ on dit pas les trois sortes d'eaux/ on dit les états/ parce que c'est la même matière mais elle est dans trois choses/(...)// ok/ alors/ maintenant/ on va voir les différents états / donc quand l'eau elle est liquide ↑ (écrit liquide)/alors j'attends que vous ayez marqué/ tu notes euh/ Younes↑
- 551.**You: oui
- 552.**Ens: d'accord (Els écrivent)/alors où est-ce qu'on la voit liquide/ l'eau↑
- 553.**Elg: dans la mer
- 554.**Ens: dans la mer/ par exemple
- 555.**Elg: dans la source
- 556.**Ens: dans la source
- 557.**Sab: dans l'eau qu'on boit
- 558.**Ens: de l'eau qu'on boit
- 559.**Elg: j'allais dire dans la rivière
- 560.**Ens: dans les rivières/ bon d'accord(...)
- 561.**Elg: l'eau de mer
- 562.**Ens: l'eau de mer on l'a dit/ rivière eau qu'on boit/ rivière et tout ça on l'a dit
- 563.**Els: source/fontaine/robinet
- 564.**Ens: l'eau de source/d'accord
- 565.**Elg: l'eau sale
- 566.**Ens: je te demande pas si elle est sale ou propre je te demande où est-ce qu'on la voit/ d'accord/ donc l'eau qu'on boit/ l'eau qui coule euh l'eau qui est dans la mer et dans les étangs et cetera c'est de l'eau

liquide d'accord/ moi je vais vous poser une question/ quand l'eau elle est euh dans les/ sur les vitres et qu'il y a de la buée/ elle est liquide/ gazeuse/ ou/ solide↑

567.Elg: gaz

568.You: elle est gazeuse

569.Ens: elle est gazeuse/ qui est d'accord avec Younes↑ (doigt levé à la caméra: Dorsaf)/et qui n'est pas d'accord avec Younes ↑ (14 doigts levés visibles à la caméra)

570.Ens: comment elle est alors Céline

571.Cel: elle est (xxx)

572.Ens: je répète/ l'eau quand elle est en buée sur une vitre ou sur un miroir/ il pense qu'elle est gazeuse/ tu dis non/ donc elle est comment/ liquide ou solide/ y a plus que deux solutions/ dis ce que tu penses et les autres [t'aideront/ si tu te trompes

573.Cel: [liquide

574.Ens: tu penses qu'elle est liquide/ pourquoi↑

575.Far: je sais (en levant le doigt)

576.Cel: (xxx)

577.Ens: explique aux autres parce que moi je sais

578.Cel: la buée elle est liquide

579.Ens: la buée elle est liquide/ qu'est-ce qui/ qu'est-ce que c'est

580.Sof: parce qu'en fait comme t'avais dit la dernière fois quand t'as de la buée et que tu passes tes doigts ils sont mouillés et c'est/ c'est de l'eau

581.Ens: comment on appelait ça là↑

582.Els: des gouttelettes

583.Ens: des goutte/lettes d'accord/ donc on peut marquer l'eau (écrit) l'eau que l'on boit/ l'eau que l'on boit de la mer//rivière// mais aussi/ la buée/ je m'arrête là après on attend (Els écrivent)/ donc ça veut dire que la buée c'est pas la même chose que la vapeur d'eau hein/ mais souvent vous confondez/ (...) bon alors maintenant vous avez compris ça vous allez m'en trouver d'autres/ donc y en a une que vous m'avez dit/ c'est aussi// les gouttelettes//bon maintenant que vous avez compris que la buée c'est de l'eau liquide et pas de la vapeur d'eau/ où est-ce qu'il y en a d'autres↑/de l'eau liquide// ne me dites pas les rivières les lacs et tout ça ça c'est bon on a vu

584.Aar: dans les nuages

585.Ens: dans les nuages/est-ce que vous êtes d'accord là↑

586.Els: oui

587.Elg: quand il pleut

588.Ens: la pluie ou les nuages↑

589.Els: la pluie/ les nuages

590.Ens: les nuages on a dit qu'ils étaient formés de↑

591.Yas: de gouttelettes

592.Ens: de gouttelettes donc les nuages (écrit) dans les nuages (Els écrivent) (...) est-ce que vous pensez à autre chose↑

593.Elg: la pluie

594.Ens: alors la pluie oui c'est de l'eau liquide on est d'accord

595.Sab: l'eau (xxx) (Ens tend l'oreille) l'eau de la montagne

596.Ens: oui mais ça on l'a dit rivière/ source c'est bon là/ (...) et alors moi je vous en dis un/ vous me dites si vous pensez que c'est liquide solide ou gazeux/ le brouillard↑

597.Els: c'est gazeux(...)

598.Ens: le brouillard alors qu'est-ce que vous en pensez /Marwah↑

599.Mar: gazeux (sonnerie)

600.Ens: gazeux/ est-ce que vous êtes d'accord avec Marwah↑/ t'es d'accord (à Sof)↑

601.Sof: oui (opine)

602.You : ça fait de la fumée/ ça fait du gaz

603.Sof: c'est parce qu'en fait le brouillard/ quand tu vois du brouillard tu fais ça mais c'est pas comme l'eau liquide (passe la main devant lui) tu fais ça peut pas l'attraper/ c'est comme c'est/ transparent tu

604.Far: oui mais maîtresse le gaz/ le brouillard quand t'es dans le brouillard/eh ben fait tu sors tu sors du brouillard t'as de la buée et dans la buée y a des gouttelettes donc c'est des gouttelettes

605.Ens: donc/ qu'est-ce que vous en pensez/ Farel il dit/ c'est de la buée/ le brouillard/ c'est des gouttelettes parce que/ quand on va dans la brouillard ça fait comme des gouttelettes et y en a d'autres qui pensent que c'est du gaz donc ce qu'on va faire c'est qu'on va pas le marquer le brouillard/ on relira notre documentaire sur l'évaporation et la condensation et on essayera de voir si on le met ici ou ici [sous gaz ou liquide] le brouillard d'accord

Extrait L4 : Élaboration de l'état physique de la buée et du brouillard– S6 [(0:47:00) -(0:58:00)]

Analyse [mésoto/chronogénèse]

Louise fait appel à la mémoire didactique pour faire rappeler les trois états de l'eau (« gaz », TdP 548 ; « solide », TdP 551 ; « liquide » au TdP 555).

Elle oriente ensuite la discussion sur l'état liquide dans la nature (« alors où est ce qu'on la voit liquide, l'eau ? », TdP 558). Les élèves citent pêle-mêle « la mer » (TdP 559, 567), « la source » (TdP 561, 569), « l'eau qu'on boit » (TdP 563), « la rivière » (TdP 566), « la fontaine » (TdP 569). Louise désigne comme pertinent l'ensemble de ces objets (TdP 560, 562, 564, 566, 568, 570, 572).

Après exclusion ferme d'un objet du milieu (« l'eau sale », TdP 571-572), elle ré-orienté la discussion sur un phénomène en particulier (« la buée sur les fenêtres », TdP 572) qu'elle soumet à une tentative de classification de la part des élèves. Plusieurs rapports à l'objet « buée » émergent : Younes affirme que la buée est à l'état gazeux (TdP 574) ; Céline la représente à l'état liquide, sans parvenir à justifier sa position (TdP 573, 576, 578) ; Sofiane défend l'idée que « quand t'as de la buée et que tu passes tes doigts, ils sont mouillés » et d'autres élèves ajoutent que ce sont des gouttelettes (TdP 580, 582). Louise désigne comme pertinent ce dernier rapport à l'objet « buée », qui est alors classifié comme liquide (TdP 583). Parallèlement, elle désigne comme non-pertinent la superposition entre « buée » et « vapeur d'eau » que les élèves effectuent souvent (TdP 583).

Aaron propose l'objet « les nuages » comme exemple d'eau à l'état liquide (TdP 584). Après clarification de la possible confusion entre pluie et nuages (TdP 588), Louise dirige l'attention des élèves sur le trait pertinent suivant : les nuages sont constitués de gouttelettes et sont donc liquides (TdP 590-592).

L'enseignante ré-orienté de nouveau la discussion sur un phénomène en particulier (« le brouillard », TdP 596). Plusieurs rapports à l'objet « brouillard » émergent alors : certains élèves croient y discerner de l'eau sous l'état gazeux (TdP 597) ; Marwah et Sofiane se joignent à cette opinion (TdP 599-601) ; pour défendre son point de vue, Younès assimile le brouillard à de « la fumée » et donc « du gaz » (TdP 602) ; Sofiane déclare que le brouillard ne ressemble pas à de l'eau liquide, puisqu'on ne peut pas se saisir d'une poignée de brouillard comme on le ferait avec de l'eau liquide (« quand tu vois du brouillard tu fais ça [passe la main devant lui] mais c'est pas comme l'eau liquide ça peut pas l'attraper », TdP 603) ; Farès, au contraire, soutient que lorsque « tu sors du brouillard t'as de la buée et dans la buée y a des gouttelettes donc c'est des gouttelettes » (TdP 604).

L'enseignante diffuse le raisonnement de Farès et organise la contradiction entre son opinion et celle des élèves qui pensent que le brouillard est du gaz (TdP 605). Elle fournit une règle d'action qui permet de trancher entre les deux groupes : la relecture du document scientifique de référence (TdP 607). À la fin de l'extrait, le statut du brouillard n'est pas complètement élucidé.

Comme précédemment, l'enseignant prend une position basse d'accompagnement en acceptant que les propositions des élèves aient une existence dans le milieu, comme par exemple lorsque

Sofiane, Younes ou Farel développent leur raisonnement en faveur/contre l'identification du brouillard à l'état gazeux. Les élèves trouvent une occasion de diffuser leurs idées au niveau du collectif.

Cependant, elle bascule vers une position topogénétique plus élevée à plusieurs occasions :

- Lorsqu'elle prend l'initiative de soumettre deux phénomènes (buée et brouillard) à l'appréciation des élèves.
- Lorsqu'elle joue de la dissemblance des opinions des élèves à propos du classement d'un phénomène en faisant ressortir l'argumentation de chaque camp : par exemple, ceux qui pensent que le brouillard constitue du gaz par opposition à ceux qui défendent l'inverse. Remarquons l'habileté particulière qu'elle démontre pour faire rebondir les élèves sur les propositions des autres. Accentué par le fait que les élèves ont probablement l'habitude de ce mode de fonctionnement, cet aspect pérenne du contrat didactique permet à Younes, Sofiane et Farel (TdP 614-616) de communiquer de façon ciblée entre eux sans intervention directe de l'enseignante.
- Lorsqu'elle exclut certains énoncés de façon surplombante (par exemple, la proposition « l'eau sale » comme exemple d'eau liquide est évacuée brutalement du milieu).
- Lorsqu'elle valide certains énoncés (l'eau de mer, de source, des rivières, des fontaines, du robinet, la buée et les nuages appartiennent à l'état liquide).

Les techniques topogénétiques que l'enseignante déploie dans l'extrait sont diversifiées et présentent de fortes ressemblances avec celles mises en œuvre dans l'extrait précédent.

Au niveau chronogénétique, tous les phénomènes ne bénéficient pas d'un temps de traitement égal : la somme du traitement relatif à l'eau de mer, de source, des rivières, des fontaines et du robinet correspond à 14 tours de parole, tandis que le traitement relatif à la buée correspond à 17 tours de parole et celui relatif au brouillard (et qui n'est pas achevé) correspond à 10 tours de parole. L'enseignante impose un ralentissement chronogénétique important lorsqu'il s'agit de déterminer le statut de la buée et du brouillard.

Interprétation et synthèse de la discussion collective relative à l'institutionnalisation d'un lexique relatif aux états de l'eau

Dans cet extrait, il s'agit de déterminer quels phénomènes de la vie quotidienne font intervenir de l'eau à l'état liquide, de l'eau à l'état gazeux ou de l'eau à l'état solide. Comme précédemment, cet exercice de catégorisation peut être considéré comme un exercice de modélisation du réel, dans le sens où il s'agit de créer une connexion entre un phénomène observé (l'eau des rivières, la buée, les nuages, le brouillard, etc.) et un modèle interprétatif (le modèle des trois états de la matière). Pour mener cette tâche, les élèves ont à disposition plusieurs ressources introduites au cours des séances précédentes :

- Bien que le document de référence ne définisse pas formellement les états de la matière, il associe systématiquement la présence de gouttelettes à l'état liquide de l'eau. Lors de la familiarisation avec le document, le terme de « gouttelette » a été défini : il s'agit de « petites gouttes ».

- De plus, lors d'une discussion précédente sur la nature de la buée, l'enseignante a fait remarquer que lorsqu'on passe ses doigts sur la buée (en mimant le geste), ils ressortent mouillés.

L'analyse des interactions dans la classe en termes de genèses nous pousse à trier les phénomènes en deux catégories :

- Le premier groupe correspond aux phénomènes qu'il est évident pour les élèves de considérer comme liquide (l'eau de mer, de source, des rivières, des fontaines et du robinet). Cette catégorisation « naturelle » provient du fait que pour ces quelques phénomènes, le point de vue quotidien les place sans ambiguïté dans la catégorie « liquide ». De plus, dans ces cas, la modélisation naïve rejoint la modélisation scientifique. Face à ces catégorisations spontanées, l'enseignante ne demande aucune justification et n'a aucun autre geste que de les valoriser rapidement en surplomb.
- Le deuxième groupe correspond aux phénomènes qu'il est difficile pour les élèves de ranger dans une catégorie (buée, nuages, brouillard). Comme développé dans l'analyse des enjeux épistémologiques (cf. 6.2), les causes de l'ambiguïté de ces phénomènes sont à chercher dans les différences qu'ils exhibent par rapport aux autres manifestations usuelles de l'eau liquide (pluie, rivière, fontaine, etc.) : ces différences sont d'autant plus exacerbées qu'une liste de phénomènes prototypiques de l'état liquide vient d'être énoncée (c'est le premier groupe de phénomènes). Au final, il peut même s'avérer tentant de penser qu'ils partagent plus de caractéristiques avec l'état gazeux qu'avec l'état liquide : c'est, par exemple, ce que défendent Younes et Sofiane pour le brouillard. Il est intéressant de noter que l'enseignante cherche sciemment à confronter les élèves avec ces cas limites, en les proposant elle-même au jugement des élèves et en aménageant un ralentissement chronogénétique dès leur apparition dans le milieu.

Cependant, les élèves possèdent autre chose à disposition qu'une modélisation naïve de l'état liquide. Même si l'état liquide n'a pas été étudié explicitement pour lui-même, plusieurs indices ont été donnés pour reconnaître cet état : l'existence de gouttelettes et le fait d'être mouillé à son contact. Ces indices constituent une première modélisation de l'état liquide : cette modélisation est à la fois assez proche d'une vision quotidienne du liquide pour établir une certaine continuité avec le rapport à l'objet « liquide » que les élèves possèdent déjà et assez opératoire pour départager les phénomènes qui avaient résisté au classement jusque-là.

- À propos de la buée, Sofiane reprend l'idée que, lorsqu'on passe les doigts sur la buée, ils ressortent mouillés : d'autres élèves complètent en précisant qu'ils sont donc couverts de gouttelettes. Ils parviennent à articuler ces deux indices afin d'asseoir l'idée que la buée correspond bien à de l'eau liquide.
- Le brouillard est un cas intéressant car il s'agit d'un phénomène qui n'a pas été abordé précédemment. Younès et Sofiane n'utilisent pas la modélisation de l'état liquide qui est partagée dans la classe et préfèrent se fier à des modélisations naïves : Younès évoque la ressemblance du brouillard et de la fumée pour défendre

l'idée que le brouillard est à l'état gazeux ; Sofiane prétend que, comme les liquides peuvent être tenus au creux de la main mais pas le brouillard, celui-ci n'est pas un liquide mais un gaz. Farès, de son côté, met en activation la modélisation partagée de l'état liquide : puisque, dit-il, lorsqu'on traverse le brouillard, on ressort couvert de buée et que la buée vient d'être basculée du côté des liquides, alors il est cohérent d'avancer que le brouillard est aussi fait de gouttelettes, et donc qu'il est liquide aussi. Il contribue à faire avancer le savoir puisque la présence de buée devient un indice supplémentaire pour décider si on est en présence de l'état liquide de l'eau. Farès parvient ainsi à articuler le faisceau d'indices de reconnaissance de l'état liquide déjà existants (l'existence de gouttelettes et le fait d'être mouillé à son contact) et à en ajouter un (la présence de buée).

Pour les deux phénomènes ambigus (buée et brouillard), certains élèves arrivent à rendre fonctionnelle la modélisation de l'état liquide, celle-ci venant contraindre efficacement l'évolution des rapports que les élèves entretiennent avec les objets de la situation.

D'ailleurs, au niveau topogénétique, l'enseignante fait confiance à la référence commune au sujet de l'état liquide pour donner un cadre productif au développement de nouveaux rapports aux objets « brouillard » et « buée » par les élèves. Il ne lui reste qu'à produire des gestes experts de contradiction entre les rapports à ces objets qui démontrent encore une vision naïve de l'état liquide et ceux qui reflètent une appropriation de la modélisation de l'état liquide pour faire émerger un classement satisfaisant. Ce milieu équilibré éclaire donc la position d'accompagnement et les variations topogénétiques que l'enseignante adopte tout au long de la discussion collective.

8.5 Synthèse de l'analyse des différents extraits : dynamique de construction des savoirs et schémas d'action

La dynamique de construction des savoirs dans la classe de Louise est résumée dans les tableaux ci-dessous qui retracent l'évolution des objets principaux du milieu (O1, O2, O3, etc.) et qui sont commentés. Nous en effectuons une synthèse en fin de chapitre.

Après constat de la diminution de la quantité d'eau dans l'éprouvette (O1), la dynamique de construction des savoirs dans la classe de Louise se scinde en deux parties.

Dans la première partie, c'est avec un regard non-outillé que les élèves sont amenés à interpréter la disparition de l'eau liquide. L'organisation du milieu primitif entraîne une multiplicité et un éparpillement des objets produits par les élèves :

1) L'eau liquide a disparu de l'éprouvette après y avoir été laissée à l'air libre.

Premières explications :

2) L'eau s'est évaporée ↔ elle a été absorbée par le plastique

3) L'eau s'est évaporée ↔ elle est partie ailleurs (ciel, air, nuages)

4) L'eau a fondu

5) L'eau est partie dans la Terre

Ces objets empruntent au répertoire lexical issu de sources externes à la classe de Louise : c'est de cette manière dont on parle de l'évaporation ailleurs, dans la vie quotidienne ou dans des classes antérieures. Nous avons déjà pointé l'absence de toute référence à la vapeur d'eau ou à un changement d'état (ou de forme) de l'eau.

L'enseignante s'est donné très peu de marge de manœuvre pour négocier le sens de ces rapports à l'objet « disparition de l'eau liquide » qui font appel à des références très diverses : elle ne peut que se contenter de les diffuser les unes après les autres, puis, par un effet de surplomb massif, d'amener les modélisations scientifiques visées à travers l'introduction du document scientifique de référence :

Introduction du document de référence :

6) L'évaporation est la transformation de l'eau liquide en vapeur d'eau. La vapeur d'eau est de l'eau sous l'état de gaz. Ce gaz est invisible. L'évaporation se produit lorsque le linge sèche ou la quantité d'eau d'un récipient diminue.

7) La condensation est la transformation de la vapeur d'eau contenue dans l'air en eau liquide. Elle se produit lorsque, du fait d'une différence de température, des gouttelettes apparaissent sous forme de nuage ou de buée.

Au-delà d'une valorisation temporaire, les propositions explicatives naïves peinent à trouver une place dans la construction des savoirs dans la classe et finissent par être balayées de manière abrupte par l'introduction de ce document qui impose l'interprétation attendue (la disparition de l'eau liquide reflète le changement d'état de l'eau liquide en vapeur d'eau, nouvelle forme d'eau qui est invisible), ce qui exclut d'autorité les autres (absorption par le support, fonte de l'eau, etc.). Il existe une discontinuité majeure entre les rapports des élèves à l'objet « disparition de l'eau liquide dans l'éprouvette » (O2, O3, O4, O5) et la modélisation de ce phénomène telle que développée dans le document (O6, O7).

À titre de comparaison, nous voudrions exposer un peu plus en détail la dynamique de construction des savoirs lors d'un événement antérieur au premier extrait analysé. En collectif, Louise a collecté les prévisions du comportement de l'eau laissée à l'air libre pendant une semaine : certains élèves pensent que l'eau va rester au même niveau mais ils évoquent soit des modifications de température (l'eau deviendrait plus chaude ou plus froide) soit des modifications d'aspect (des bulles apparaîtraient), d'autres élèves défendent l'idée que le niveau de l'eau va baisser. Quelques jours après, après observation de l'état de l'eau dans

l'éprouvette, le devenir de ces prévisions est contrasté : tandis que la baisse du niveau de l'eau est immédiatement reconnue, des bulles sont constatées mais elles ne sont pas problématisées plus avant (elles ne sont clairement pas destinées à devenir un objet d'étude) et les autres observations prévues ne sont pas vérifiées (aucune mise en place d'un thermomètre pour vérifier l'éventuelle hausse ou baisse de la température de l'eau, par exemple). Donc, dans ce cas aussi bien que dans l'autre, la plupart des rapports initiaux aux objets des élèves ne trouvent pas d'issue dans le flux des savoirs institués et Louise n'arrive pas à amorcer des articulations continues de ces rapports aux objets vers les savoirs attendus.

Nous interprétons ces difficultés d'insertion des objets introduits par les élèves dans la chronogenèse comme un manque intrinsèque de potentiel d'exploitabilité de ces représentations afin de les orienter vers les enjeux de savoir de la séquence : il semble complexe d'utiliser la prévision (correcte) de la présence de bulles dans l'éprouvette d'eau ou l'interprétation que « l'eau est absorbée par son support » pour faire émerger des savoirs sur l'évaporation. C'est exactement cette raison qui explique la marge de manœuvre restreinte de l'enseignante dont l'ultime recours est de faire passer « en force » les modélisations scientifiques visées. Bien que les élèves aient eu l'occasion de s'exprimer dans cette première partie, ils ne participent pas vraiment à la dynamique de construction des savoirs.

Dans la seconde partie, c'est avec un regard armé des modélisations du document que les élèves sont amenés à ré-expliquer le phénomène de disparition de l'eau liquide :

Secondes explications :

- 8) L'eau est devenue de la vapeur, c'est-à-dire du gaz.
- 9) La vapeur est partie de l'éprouvette, d'où la baisse de la quantité d'eau.
- 10) On n'a pas pu voir la vapeur car elle est invisible.
- 11) La vapeur d'eau est « une forme d'eau », comme le glaçon en est une autre.
- 12) Pour la rendre « visible », il faudrait placer l'éprouvette près de la fenêtre pour qu'elle se transforme en buée mais ça ne marcherait que si la fenêtre est froide.

Les objets (O8, O9, O10) démontrent la tentative des élèves de mettre en lien l'expérience vécue de disparition de l'eau liquide de l'éprouvette (O1) avec la modélisation de l'évaporation apportée par le document (O6). L'objet (O12) reflète le nouvel enjeu que se donnent certains élèves : « rendre visible » la vapeur d'eau. Pour l'atteindre, ils sont capables de relier certains éléments des modèles de l'évaporation et de la condensation entre eux, puis d'élaborer un protocole expérimental simple.

L'objet (O11) établit une connexion entre une connaissance stable issue de sources externes à la classe (la glace comme forme particulière d'eau) et un élément de la modélisation de l'évaporation (la vapeur d'eau comme autre forme particulière d'eau). Il est donc possible de s'appuyer sur des connaissances issues de la vie quotidienne pour faire avancer le savoir, à condition d'avoir examiné au préalable leur potentiel de continuité avec les modélisations scientifiques visées.

Toujours dans cette seconde partie, c'est avec un regard armé d'une modélisation primitive de l'état liquide que les élèves sont amenés à classer l'eau des phénomènes de la vie quotidienne sous l'état approprié, en particulier la buée, les nuages et le brouillard :

Comment catégoriser certains phénomènes sous l'état approprié ?

- 13) L'eau de mer, de source, des rivières, des fontaines et du robinet sont de l'eau à l'état liquide.
- 14) La buée est du gaz
- 15) Vs La buée est du liquide car quand on passe les doigts dessus, ils sont mouillés et couverts de gouttelettes
- 16) Le brouillard est du gaz car il ressemble à de la fumée et on ne peut pas le tenir dans les mains comme un liquide
- 17) Vs Le brouillard est du liquide car après être passé dedans, on ressort couvert de buée et donc de gouttelettes.

Certains élèves maintiennent le recours à des modélisations naïves afin de déterminer l'état physique de l'eau d'un phénomène (O13, O14, O16). D'autres s'appuient sur la modélisation de l'état liquide construite en classe (O15, O17). Cette modélisation met en avant plusieurs critères pour déterminer si l'eau est à l'état liquide : l'existence de gouttelettes, le fait d'être mouillé, la présence de buée. C'est une modélisation subtile dans le sens où elle découle assez spontanément de ce que les élèves pourraient déjà savoir de l'état liquide (d'où une continuité d'avec leur expérience personnelle) tout en étant assez puissante pour départager les cas ambigus (brouillard, etc.) Nous rappelons d'ailleurs que les définitions de l'état liquide données classiquement en classe de sciences (« l'état liquide est l'état qui admet une surface libre horizontale » ; « le liquide prend la forme du récipient qui le contient ») sont contre-productives pour arriver à classer les phénomènes limites. Le brouillard est un cas à part dans la progression des savoirs car il apparaît pour la première fois dans le milieu : dans son cas, il s'agit de mettre à l'épreuve la modélisation de l'état liquide.

Dans la seconde partie, le « choc » dû au passage en force des modélisations de l'évaporation et de la condensation s'adoucit : les tâches suivantes contribuent à rétablir de la continuité entre l'expérience personnelle des élèves (ce qu'ils ont perçu de la disparition de l'eau liquide, mais aussi ce qu'ils connaissent déjà de la glace en tant qu'état de l'eau, ou des liquides comme étant constitués de gouttes, etc.) et les modélisations de l'évaporation, de la condensation et de l'état liquide. Certains élèves démontrent qu'ils sont capables de revisiter des phénomènes déjà connus (les nuages, la buée, la disparition de l'eau liquide laissée à l'air libre) à travers le filtre des modèles proposés : l'étude leur a permis de prendre de la distance avec un point de vue naïf pour amorcer une transition vers la maîtrise de certains éléments de modélisation. Cependant, à ce stade-là, les modèles introduits sont d'une portée assez limitée : ils ne permettent pas de prévoir l'évolution d'un phénomène, par exemple. Pour qu'ils portent vraiment leur fruit, il faut attendre la fin de la séquence où leur utilisation combinée permet de concevoir et mettre en œuvre une expérience de désalinisation de l'eau, inédite du point de vue des élèves.

L'introduction des modélisations scientifiques de référence dans le milieu permet également d'ouvrir l'espace de négociation des rapports aux objets des élèves par l'enseignante, modélisations sur lesquelles celle-ci peut réellement s'appuyer pour faire avancer son projet d'enseignement. Elle déploie alors une palette diversifiée de techniques topogénétiques : elle est capable de se placer en retrait ; faire preuve de postulation mimétique ; se mettre en position d'accompagnement ; utiliser une coalition ; se mettre en surplomb, etc. Au niveau des techniques mésogénétiques, elle est à même d'organiser la contradiction ou de fournir des éléments de corroboration entre plusieurs objets, dont certains penchent du côté des modélisations scientifiques et d'autres, du côté des propositions explicatives naïves. C'est cette diversification des gestes de l'enseignante qui permet de créer un cheminement continu entre les idées des élèves et les idées qui sont progressivement instituées ; et en même temps, c'est l'introduction des modélisations du document de référence qui autorise cette expansion des gestes de l'enseignante.

Quel degré de continuité entre les rapports aux objets construits par les élèves et ceux visés par l'enseignante ?

Au début de la séquence, les élèves ont l'occasion d'exprimer leurs premières idées par rapport à la baisse du niveau de l'eau dans l'éprouvette qui vient d'être constatée :

- L'eau a été absorbée par le plastique de l'éprouvette
- Elle est partie ailleurs (ciel, air, nuages), etc.

Le document de référence, en introduisant dans le milieu les modélisations scientifiques relatives à l'évaporation et la condensation parmi lesquelles figurent certains objets cruciaux (l'existence d'une forme d'eau invisible appelée vapeur) amène une discontinuité majeure entre les rapports aux objets construits par les élèves et ceux visés par l'enseignante. Les deux tâches suivantes s'attèlent à résorber cette discontinuité :

- En revisitant la disparition de l'eau liquide avec un regard outillé, les élèves parviennent à y discerner la création d'une nouvelle forme d'eau et à la conceptualiser en la reliant à une autre forme déjà reconnue (la glace).
- Certains élèves sont en mesure de catégoriser la buée et le brouillard sous l'état liquide en explorant les implications des modélisations introduites. Deux critères leur permettent de faire évoluer leur représentation de ces phénomènes : la présence de petites gouttes et le fait d'être mouillé au contact de la buée.

À travers les tâches succédant à l'introduction du document de référence, certains élèves sont capables de rendre fonctionnels les nouveaux objets relatifs à l'eau liquide, à la vapeur d'eau et aux changements d'état que le document fournit.

En résumé, la dynamique de construction des savoirs laisse apparaître une discontinuité majeure lors de l'introduction du document de référence qui apporte les modélisations de l'évaporation et de la condensation : d'ailleurs, les rapports aux objets construits par les élèves pour rendre compte de la baisse du niveau de l'eau liquide dans l'éprouvette ne seront plus évoqués dans la suite. Puis, cette discontinuité est progressivement résorbée à travers certains schémas d'action mis en œuvre par Louise que nous détaillons ci-après.

Quels schémas d'action l'enseignante développe-t-elle au cours de la négociation des rapports aux objets avec les élèves pour atteindre ce degré de continuité ?

L1) Louise encourage les élèves à s'exprimer tout au long de la séquence. En particulier, les rapports initiaux que les élèves entretiennent vis-à-vis de certains objets de la thématique abordée (par exemple, l'objet « disparition de l'eau liquide ») en constituent le point de départ. Plusieurs productions d'élève sont qualifiées d'« hypothèses » : les premières tentatives de solution à apporter au défi GrandSoif, les anticipations des élèves sur le comportement de l'eau laissé à l'air libre pendant une semaine et les explications au sujet de la disparition de l'eau liquide, une fois celle-ci constatée.

L2) Elle introduit l'ensemble des modélisations visées tôt au sein de la séquence et déploie des gestes diversifiés pour que les élèves s'en emparent :

- L2a) Elle organise un ralentissement chronogénétique dès leur introduction, en proposant des tâches d'application des modélisations introduites : un réexamen de la disparition de l'eau liquide et une réévaluation des phénomènes familiers de buée et de brouillard.
- L2b) Elle montre une palette diversifiée de techniques topogénétiques et mésogénétiques qui permettent de négocier les apports des élèves dans le milieu. Par exemple, elle organise la contradiction entre plusieurs objets du milieu, dont certains explorent les modélisations introduites et d'autres mobilisent des points de vue quotidiens.
- L2c) Elle met en relief les caractéristiques des modélisations imposées qui sont compatibles avec ce que les élèves savent probablement déjà : par exemple, les gouttes caractérisent l'état liquide ; le fait d'être mouillé (et donc, couvert de gouttes) en passant le doigt contre la buée permet de la situer sous l'état liquide ; le fait que la glace est une autre forme d'eau soutient le fait que la vapeur en est une autre, etc.

La conjonction de ces schémas d'action permet d'éclairer les conclusions formulées à propos des degrés de continuité :

- Louise recueille et diffuse les rapports initiaux à l'objet « disparition de l'eau liquide » (L1) mais aucun de ces rapports ne mentionne un changement de forme ou d'état de l'eau. Dans ce cadre, l'introduction précoce des modélisations qui se fondent sur l'existence d'une forme d'eau invisible (L2) ne peut que créer une discontinuité importante avec les idées premières des élèves.
- Puis, la diversification des gestes de l'enseignante (L2a, L2b, L2c) qu'autorise l'introduction du document de référence (L2) fournit des ressources aux élèves qui leur permettent de construire des liens entre la baisse de niveau de l'eau liquide, le brouillard, la buée, d'une part et les concepts théoriques de vapeur d'eau, d'évaporation et de condensation, d'autre part, ce qui éclaire le comblement constaté de la discontinuité.

Chapitre 9 ANALYSE EMPIRIQUE D'UNE CLASSE AU SECONDAIRE INFÉRIEUR EN SUISSE ROMANDE : ESTHER

Le Chapitre 9 et le Chapitre 10 poursuivent le travail empirique, à travers deux autres études de cas au secondaire inférieur. Le premier concerne une classe en Suisse Romande (la classe d'Esther) et le second une classe en France (la classe de Nathan).

Contrairement aux analyses du primaire qui balayaient la façon dont une notion (la vapeur d'eau) se construisait au fil des interactions enseignant-élèves à l'échelle de plusieurs séances, la densité plus importante des savoirs au secondaire nous conduit à nous concentrer sur le déroulement d'une activité particulière, toujours sur le thème des transitions liquide-gaz de l'eau. Dans la classe d'Esther, nous étudierons une activité qui aborde le phénomène d'évaporation et qui vise l'utilisation et l'affinement d'un modèle moléculaire adapté au phénomène en jeu. Dans la classe de Nathan, nous étudierons une activité qui s'intéresse au phénomène d'ébullition et dont l'objectif réside dans la construction du modèle du palier de température (modèle qui lie la stagnation de la température et le déroulement de la vaporisation). Ce choix nous permet d'obtenir des analyses complètes à l'échelle d'une activité, d'une part et susceptibles d'être comparées entre elles et avec celles du primaire, d'autre part.

Les principes organisateurs qui président aux analyses de ces chapitres sont similaires à ceux des chapitres précédents dédiés aux classes de l'enseignement primaire : nous renvoyons le lecteur intéressé à l'introduction du Chapitre 7 qui les développe plus en détail.

9.1 Présentation du contexte de la classe d'Esther

Nous présentons le contexte de la classe d'Esther, en donnant quelques repères par rapport à l'école et la classe ainsi que l'enseignante.

9.1.1 Le cycle d'orientation et la classe

Le cycle d'orientation est situé dans le canton de Genève et comprend plusieurs classes par niveau.

La classe observée correspond au niveau 11^{ième} (c'est-à-dire des élèves âgés de 14 à 15 ans, qui sont dans la troisième année du secondaire inférieur). Elle correspond à la section LS (littéraire et scientifique), section qui accueille les élèves qui se destinent généralement à une formation gymnasiale et à des études supérieures longues (université, écoles polytechniques fédérales). De plus, les élèves ont choisi le profil « scientifique », ce qui signifie que la plupart d'entre eux ont déjà bénéficié d'un enseignement de physique l'année précédente avec un enseignant spécialiste. Cependant, les programmes de physique de 10^{ième} sont, dans une large mesure, indépendants des programmes de 11^{ième}, et au final, Esther affirme ne pas voir de différences significatives entre les élèves qui ont suivi l'enseignement de physique l'année précédente et les élèves qui ne l'ont pas suivi. Le nombre d'élèves par classe est réduit pour cette discipline et ce niveau : la classe comprend 10 élèves, qui forment la moitié d'une classe complète.

Selon Esther, le milieu social d'origine des élèves relève de la classe moyenne à aisée. Bien que les élèves appartiennent tous à la même section (LS), l'enseignante estime le niveau plutôt hétérogène et souligne que certains élèves ont été promus par tolérance l'année précédente tandis que d'autres dépassent amplement les exigences de l'institution. Elle estime que certains élèves font preuve d'une certaine « paresse intellectuelle » et ne vont pas au bout de leurs capacités de réflexion (entretien ante observation, min 28). Un élève est considéré comme perturbateur.

9.1.2 L'enseignante

Après un Master de physique à l'Université de Genève avec une spécialité en Matière Condensée, Esther a travaillé pendant 6 ans dans plusieurs laboratoires de physique appliquée en lien avec l'EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne). Elle s'est ensuite engagée dans le cursus de formation des enseignants du secondaire à l'IUFE (MASE ; Maîtrise universitaire en enseignement secondaire). Elle enseigne la physique depuis 4 ans, dans le même cycle d'orientation où se situe la recherche.

9.2 Présentation générale des séances observées

La partie observée dans la classe d'Esther correspond à six séances d'une heure et demie.

Elle s'insère dans une séquence sur les propriétés de la matière qui vise à permettre l'étude des transformations physiques de la matière en termes de comportements moléculaires et d'échanges énergétiques (cf. Tableau 12, p. 230). Des productions écrites relatives à cette

séquence (les moyens d'enseignement du canton de Genève relatifs aux propriétés de la matière, les documents distribués aux élèves) se trouvent dans l'annexe C.

Au sein de cet enjeu de niveau N+2, on peut distinguer un unique enjeu de niveau inférieur (N+1) : l'étude des changements d'état des corps purs en termes de comportements moléculaires et d'échanges énergétiques. Au sein de celui-ci, trois enjeux de niveau inférieur (niveau N) ont pu être décantés : le premier concerne l'étude du phénomène d'ébullition aux échelles macroscopique et microscopique (N1) ; le second est relatif à l'étude du phénomène d'évaporation aux échelles macroscopique et microscopique (N2) ; le troisième traite de l'étude du phénomène de solidification aux échelles macroscopique et microscopique (N3).

Ces différents découpages sont résumés dans le synopsis ci-dessous (cf. Tableau 12, p. 230) :

Enjeux de niveau N+2	Enjeux de niveau N+1	Enjeux de niveau N

Etude des transformations physiques de la matière en termes de comportements moléculaires et d'échanges énergétiques	Etude des changements d'état des corps purs en termes de comportements moléculaires et d'échanges énergétiques	Etude du phénomène d'ébullition aux échelles macroscopique et microscopique- S1 [90 min] N1
		Etude du phénomène d'évaporation aux échelles macroscopique et microscopique S1-S2 [95 min] N2
		Etude du phénomène de solidification aux échelles macroscopiques et microscopiques S3 - ... [120 min] N3

Tableau 12 : Synopsis de la séquence de la classe d'Esther

Si on tient compte des contraintes de choix précédemment évoquées, nous nous intéressons à un enjeu ayant pour thème un changement d'état de l'eau qui fait intervenir l'état gazeux. L'étude de l'ébullition (N1) et de l'évaporation (N2) pourraient satisfaire ces critères. Mais, l'étude de l'ébullition (N1) a démarré avant le début de la prise de données : en particulier, l'expérience de l'ébullition a déjà été menée, accompagnée de premières interprétations en termes de comportements moléculaires et d'échanges énergétiques. Nous préférons donc nous diriger vers l'enjeu (N2) qui apparaît en entier et de façon développée dans le corpus de données, c'est-à-dire l'étude du phénomène d'évaporation aux échelles microscopique et macroscopique (cf. la partie grisée dans le Tableau 12). C'est ce dernier que nous analysons en détail ci-dessous.

9.3 Présentation de l'enjeu N2 étudié : Étude du phénomène d'évaporation aux échelles macroscopique et microscopique

9.3.1 Description générale de l'enjeu N2 : Étude du phénomène d'évaporation aux échelles macroscopique et microscopique

L'enjeu N2 est divisé en deux enjeux de niveau inférieur : d'abord une introduction aux caractéristiques macroscopiques et microscopiques du phénomène d'évaporation (N21) puis, une étude de l'interprétation microscopique des facteurs d'accélération de l'évaporation (N22) (cf. Tableau 13, p. 231).

Enjeux de niveau N	Enjeux de niveau N-1	Phases d'action <i>Apports principaux dans la mésogenèse en termes de contenus</i> Résultats d'institutionnalisation en gras
<p>Étude du phénomène d'évaporation aux échelles macroscopique et microscopique N2</p>	<p>Introduction aux caractéristiques macroscopiques et microscopiques de l'évaporation N21</p>	<p>Problématisation & présentation de l'expérience <i>Problématisation : comment l'eau des flaques réussit-elle à se vaporiser sans passer par l'ébullition (100°C)?</i> Collectif - S1(40' – 49') N21a</p>
		<p>Mise en place de l'expérience & Consigne <i>Une goutte d'eau et une goutte d'alcool placées dans deux verres de montre sont distribuées aux duos.</i> <i>Consigne : observer ce qu'il se passe pour les deux gouttes</i> Collectif - S1(49' – 55') N21b</p>
		<p>Observation et description de ce qu'il se passe pour les deux gouttes Duo - S1(55' – 61') N21c</p>
		<p>Mise en commun des observations & Consigne La goutte d'alcool est plus bombée et disparaît en s'évaporant plus rapidement que la goutte d'eau. <i>Consigne : en se basant sur les différences entre l'eau et l'alcool, expliquer l'évaporation au niveau des molécules.</i> Collectif - S1(61' – 67') N21d</p>
		<p>Recherche d'hypothèses afin d'expliquer l'évaporation au niveau des molécules Duo - S1(67' – 71') N21e</p>
		<p>Discussion des hypothèses et adoption d'un modèle moléculaire de l'évaporation Rejet de certaines hypothèses (milieu environnant, frottement, etc.) Modèle moléculaire de l'évaporation : les molécules à la surface du liquide ont moins de liaisons intermoléculaires que les autres; elles sont parfois assez agitées pour s'en échapper. Collectif - S1(71' – 85') N21f</p>
	<p>Etude de l'interprétation microscopique des facteurs d'accélération de l'évaporation N22</p>	<p>Consigne & Indication <i>Consigne : expliquer les facteurs accélérant l'évaporation au niveau des molécules</i> <i>Indication: comment faire sécher le plus rapidement possible du linge mouillé ?</i> Collectif - S1(85' – 87') N22a</p>
		<p>Recherche des facteurs d'évaporation et de leur explication au niveau des molécules Duo puis travail à la maison - S2(87' – 90) N22b</p>
		<p>Discussion de l'interprétation microscopique des facteurs d'évaporation Rejet du sel en tant que facteur d'évaporation. Une source de chaleur permet une augmentation de température: l'agitation des molécules augmente donc les liaisons se brisent plus facilement. Plus la surface en contact avec l'air est grande, plus le nombre de molécules qui a des liaisons faibles est élevé. Le mouvement coordonné du vent permet d'emporter au loin les molécules d'eau déjà sorties du liquide. Un sèche-linge conjugue les trois facteurs précédents: source de chaleur, surface, vent. Plus la pression de l'air ambiant diminue, plus les molécules du liquide s'échappent facilement. Collectif - S2(3' – 35') N22c</p>

Tableau 13 : Synopsis de l'enjeu N2 « Étude du phénomène d'évaporation aux échelles macroscopique et microscopique »

Enjeu N21 : Introduction aux caractéristiques macroscopiques et microscopiques du phénomène d'évaporation

Le traitement de cet enjeu se déroule en plusieurs phases d'action :

- Dans la première phase (N21a), l'enseignante construit le problème émergent du phénomène d'évaporation (comment l'eau des flaques réussit-elle à se vaporiser sans passer par l'ébullition ?) et présente l'expérience à venir.
- Dans la deuxième phase (N21b), celle-ci est mise en place (une goutte d'eau et une goutte d'alcool déposées sur deux verres de montre devant chaque duo de la classe) et l'enseignante précise qu'il s'agit d'observer le comportement des deux gouttes.
- Dans la troisième phase (N21c), les élèves observent et décrivent en duo le comportement des deux gouttes.
- Dans la quatrième phase (N21d), une discussion collective a lieu et mène à la conclusion que la goutte d'alcool s'évapore plus rapidement que la goutte d'eau. Une nouvelle tâche est proposée aux élèves : expliquer le phénomène d'évaporation au niveau des molécules.
- Dans la cinquième phase (N21e), les élèves imaginent et formulent des hypothèses afin d'expliquer l'évaporation au niveau des molécules
- La sixième phase (N21f) amène, dans une discussion collective, au rejet de certaines hypothèses des élèves et à la validation d'un modèle moléculaire de l'évaporation (cf. Figure 31) :

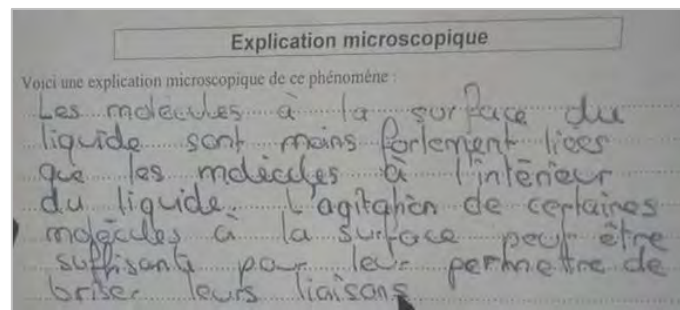


Figure 31 : Institutionnalisation du modèle moléculaire de l'évaporation

Selon le modèle moléculaire de l'évaporation, « les molécules à la surface du liquide ont moins de liaisons intermoléculaires que celles au sein du liquide et l'agitation de certaines peut être suffisante pour leur permettre de briser leurs liaisons et de s'échapper du liquide ».

Au total, l'introduction aux caractéristiques macroscopiques et microscopiques de l'évaporation (N21) s'étale sur environ quarante-cinq minutes de la première séance observée.

Enjeu N22 : Etude de l'interprétation microscopique des facteurs d'accélération de l'évaporation.

La mise en œuvre de cet enjeu est également fractionnée en plusieurs phases :

- Dans la première phase (N22a), une tâche est proposée aux élèves : à partir du souvenir des conditions optimales de séchage des vêtements, il s'agit de trouver les facteurs

accélérant l'évaporation, dans un premier temps et de les expliquer au niveau des molécules, dans un second temps.

- Dans la deuxième phase (N22b), les élèves recherchent les facteurs d'accélération de l'évaporation et en donnent une interprétation microscopique. Ce travail se poursuit à la maison.
- Dans la troisième phase (N22c), une discussion collective a lieu et mène à la validation des quatre facteurs d'évaporation (chaleur, surface en contact avec l'air, vent, pression) accompagnés de leur interprétation microscopique.

Les interprétations microscopiques des facteurs d'accélération de l'évaporation qui sont retenues sont les suivantes :

- « Une source de chaleur permet une augmentation de température : l'agitation des molécules augmente donc les liaisons se brisent plus facilement.
- Plus il y a de molécules en surface, plus l'évaporation va se faire vite, car le nombre de molécules qui ont des liaisons faibles est plus élevée (cf. Figure 32).
- Le mouvement ordonné des molécules dans l'air [du vent] va emporter loin de la surface les molécules qui s'en sont détachées et empêcher celles-ci de retomber dans le liquide et de reformer des liaisons (cf. Figure 32).
- En diminuant la pression sur la surface du liquide, on permet aux molécules de s'en échapper plus facilement. L'évaporation se fait donc plus vite ».

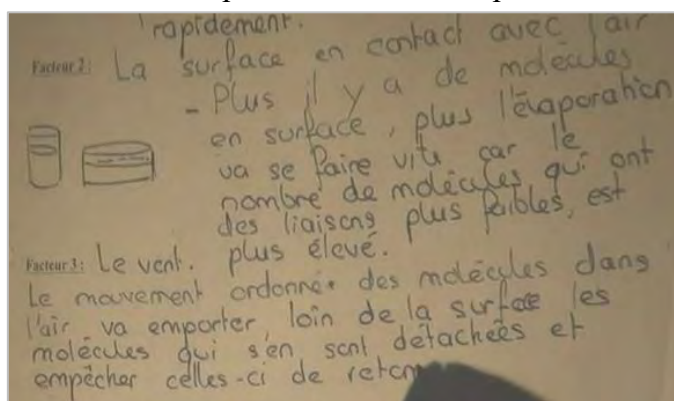


Figure 32 : Extrait de l'institutionnalisation de l'interprétation microscopique des facteurs d'accélération de l'évaporation

Au total, l'étude de l'interprétation microscopique des facteurs d'accélération de l'évaporation s'étale sur environ cinquante minutes, réparties entre la première et la deuxième séance observée.

Ces phases sont décrites avec davantage de détails dans le synopsis ci-dessus (cf. Tableau 13, p. 231).

9.3.2 Choix des phases étudiées

Nous effectuons l'analyse microscopique de trois phases (cf. les parties grisées du Tableau 13, p. 231).

La première phase étudiée (N21f) est une discussion collective qui mène au modèle moléculaire de l'évaporation. Ce modèle constitue un enrichissement des modèles moléculaires qui avaient cours jusque-là dans la classe dans le sens où il ajoute des informations inédites : les molécules de la surface possèdent moins de liaisons intermoléculaires que les autres ; en conséquence, ce sont les molécules de surface les plus agitées qui sont responsables du phénomène d'évaporation.

La deuxième phase étudiée (N22b) correspond aux travaux de groupe qui traitent de la mise en relation du modèle moléculaire de l'évaporation formalisé dans la phase (N21f) avec les facteurs d'accélération de l'évaporation qui sont à déterminer à partir du souvenir des conditions optimales de séchage des vêtements. Nous l'étudierons du point de vue du groupe de Diane et Charlene. La troisième phase étudiée (N22c) est la discussion collective qui s'ensuit et qui mène à l'interprétation microscopique de quatre facteurs d'accélération de l'évaporation (chaleur, surface en contact avec l'air, vent, pression).

L'analyse de la dynamique de co-construction des savoirs au cours de ces trois phases est intéressante, dans la mesure où ce qui est demandé aux élèves va d'un exercice d'enrichissement d'un modèle moléculaire à partir de l'observation de l'évaporation d'une goutte d'eau et d'une goutte d'alcool (N21f) à un exercice d'application du modèle moléculaire de l'évaporation à des faits empiriques à délimiter (N22 b et N22c). La modélisation moléculaire de l'évaporation constitue donc le but de la première phase (N21f) et le moyen d'atteindre d'autres savoirs dans la seconde et troisième (N22b et N22c).

Dans ces deux cas contrastés, nous nous intéresserons notamment à la nature des objets apportés par les élèves dans le milieu et aux modes de gestion de ces objets par l'enseignante.

9.3.3 Positionnement par rapport au document institutionnel de référence

Il est possible d'établir une connexion entre la nature des institutionnalisations ci-dessus et les parties suivantes du PER 2011 (cf. Figure 33) :

Caractérisation des états (solide, liquide, gaz) de la matière par leurs propriétés macroscopiques et représentation de ces trois états à l'aide d'un modèle décliné à l'échelle des molécules

Utilisation d'un modèle moléculaire pour interpréter, en termes d'agitation moléculaire et de liaison intermoléculaire, le changement de température et le changement d'état physique et pour donner du sens à quelques phénomènes et grandeurs physiques : température, dilatation, variation de pression des gaz, évaporation, et faire le lien avec des phénomènes atmosphériques

Au cours, mais au plus tard à la fin du cycle, l'élève...	Ressources, indices, obstacles. Notes personnelles
<p>...représente la matière par des molécules et des atomes</p> <p>...classe « atome », « molécule », « homme », « Terre », « système solaire », « galaxies », « Univers » sur une échelle de dimension et en donne un ordre de grandeur Niv. 2</p> <p>...identifie une substance à partir de mesures de masse et de volume</p> <p>...utilise un modèle moléculaire pour interpréter les caractéristiques des états de la matière</p> <p>...utilise un modèle moléculaire pour interpréter ou prévoir l'évolution de phénomènes physiques : dilatation, diffusion dans les liquides et les gaz, changement de température</p>	<p><i>L'accent est porté sur :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - l'acquisition d'un modèle moléculaire pour prévoir et expliquer des phénomènes observés à l'échelle humaine - l'étude de phénomènes permettant de distinguer les substances entre elles - le fait d'habituer l'élève à distinguer les transformations chimiques des transformations physiques de la matière - le fait d'obliger l'élève à des passages fréquents du champ empirique au champ théorique pour l'amener à distinguer la réalité du modèle <p><i>Le choix de se limiter aux éléments carbone, oxygène, hydrogène et fer est nécessaire afin de limiter la complexité des situations traitées tout en restant suffisamment représentatif de la réalité physico-chimique des matières qui nous entourent</i></p>

Figure 33 : Extrait du PER sur les propriétés de la matière

Comme dans les autres parties du PER (cf. analyse plus détaillée du plan d'études à la section 3.2), l'accent est mis sur la modélisation, et notamment « l'acquisition d'un modèle moléculaire pour prévoir et expliquer les phénomènes observés à l'échelle humaine » et « le fait d'obliger l'élève à des passages fréquents du champ empirique au champ théorique ». Il est intéressant de noter que les exigences ne portent pas sur la capacité à **construire** un modèle mais à « **utiliser** un modèle pour interpréter les caractéristiques des états de la matière » ou pour « prévoir l'évolution de phénomènes physiques », ce qui circonscrit d'une certaine manière les responsabilités de l'enseignant et des élèves. Le rôle de l'enseignant est de trouver un modèle approprié et une série de phénomènes physiques auxquels il peut s'appliquer. Le rôle des élèves est de construire des connexions entre les deux types d'objets que lui soumet l'enseignant (modèle, d'une part et série de phénomènes physiques, d'autre part).

Cependant, au-delà de cette prescription institutionnelle, très peu de détails sont fournis à propos du type de modèle à enseigner. Il existe une variété de modèles moléculaires dans les institutions académiques de référence : comment choisir un modèle assez simple pour des élèves du secondaire inférieur mais suffisamment robuste pour expliquer les phénomènes physiques prescrits ? Nous faisons l'hypothèse que c'est parce que le PER compte sur les moyens d'enseignement cantonaux (MEC) pour prendre le relai sur ces questions précises qu'il se permet d'être si elliptique à leur propos.

Les MEC du canton de Genève intègrent effectivement une séquence sur les propriétés de la matière : plusieurs documents fournissent une progression détaillée des enseignements / apprentissages à travers un enchaînement de situations que l'enseignant est supposé proposer aux élèves. L'analyse de cette séquence (Marty & Ligozat, accepté) montre qu'elle peut être considérée comme une ingénierie didactique (Artigue, 2002), notamment au niveau du contrôle de la cohérence épistémologique des enjeux de savoir. En cohérence avec le PER, elle est fondée sur la modélisation, c'est-à-dire la confrontation entre faits expérimentaux et constructions théoriques. En s'inspirant de travaux de didacticiens francophones (Larcher, Chomat & Méheut, 1990 ; Séré, 1992 ; Genzling, 1988 entre autres), elle s'affiche sous la forme

d'une succession d'activités de structure similaire : présentation d'un modèle primitif – introduction d'un phénomène – application/enrichissement du modèle primitif afin d'expliquer le phénomène et/ou de prédire son évolution – introduction d'un nouveau phénomène – application/enrichissement du modèle qui a déjà été complété à l'étape précédente – etc. Cette manière de reconstruire le savoir dans la classe s'appuie donc sur une structure « cyclique » de l'avancée des savoirs.

9.4 Analyse microscopique des trois phases : N21f, N22b et N22c

9.4.1 Contextualisation de ces trois phases au sein de la séquence

Contextualisation globale (à l'échelle de la séquence)

Dans la classe étudiée, l'étude du phénomène d'évaporation se situe à la toute fin du traitement de la séquence sur les propriétés de la matière. Cette étude a démarré dans la classe considérée au début de l'année scolaire (4 mois avant la partie observée). Ainsi, un premier niveau de formulation d'un modèle moléculaire a été introduit en début d'année :

- « La matière est représentée par un ensemble de petits grains, appelés molécules.
- Une molécule ne se déforme pas et possède une masse. La masse d'un objet est la somme de la masse de toutes ses molécules.
- Selon l'espèce chimique, les molécules ne sont pas toutes identiques. »

Puis, plusieurs types de tâches ont été conduits sur le même schéma : il s'agissait d'utiliser ou d'enrichir ce modèle moléculaire initial afin d'expliquer ou prévoir certains phénomènes. Le Tableau 14 résume les connexions entre les phénomènes physiques et les modèles moléculaires successivement enrichis que les tâches abordées depuis le début de l'année scolaire ont permis d'établir dans la classe observée.

Phénomène	Interprétation moléculaire (application ou enrichissement du modèle de premier niveau)
<i>Observation : Les solides ont un volume propre, une forme propre et ils sont incompressibles.</i>	Les molécules d'un solide sont très rapprochées et fortement liées entre elles : elles ne peuvent pas se déplacer les unes par rapport aux autres.
<i>Observation : Les liquides ont un volume propre mais pas de forme propre. Ils sont incompressibles.</i>	Les molécules d'un liquide sont très rapprochées mais peu liées de sorte qu'elles ne peuvent pas se rapprocher mais elles peuvent se déplacer les unes par rapport aux autres.
<i>Observation : Les gaz sont compressibles et expansibles. Ils occupent tout le volume à disposition.</i>	Les molécules d'un gaz sont espacées et non liées entre elles.
<i>Observation : Une odeur de parfum se répand dans une salle fermée.</i>	Les molécules d'un gaz s'agitent de manière désordonnée, ce qui rend possible leur déplacement dans l'espace. C'est la diffusion des gaz.
<i>Observation : Le bouchon d'un tube d'air fermé saute lorsqu'il est introduit sous une cloche à vide mise en fonctionnement.</i>	La fréquence des chocs des molécules de l'air diffère entre les parois internes et externes des tubes. La pression d'un gaz est une grandeur macroscopique

	associée à la fréquence des chocs des molécules contre la surface considérée.
<i>Observation : Le bouchon d'un tube d'air fermé saute lorsqu'il est chauffé par un Bec Bunsen.</i>	La température d'un gaz est une grandeur macroscopique associée à l'importance de l'agitation moléculaire désordonnée, et donc à la vitesse moyenne des molécules. La pression d'un gaz dépend de sa température car les chocs des molécules contre une surface sont d'autant plus fréquents que la vitesse et la densité des molécules sont grandes.
<i>Observation : Un colorant se diffuse plus rapidement dans un liquide bouillant que dans un liquide à température ambiante.</i>	Les molécules d'un liquide se déplacent de façon désordonnée en glissant et rebondissant les unes sur les autres.
<i>Observation : Lorsqu'on place le bout d'une cuillère dans une flamme, le manche se réchauffe progressivement.</i>	Les molécules d'un solide oscillent sur place et peuvent transférer de proche en proche l'agitation thermique.
<i>Observation : Une boule en acier chauffée par une flamme augmente de volume.</i>	À cause du surplus d'agitation thermique, l'écartement moyen des molécules du solide augmente. C'est la dilatation thermique.
<i>Observation : Un morceau de sucre se dissout plus rapidement dans un verre d'eau chaude que dans un verre d'eau froide.</i>	Les molécules du liquide percutent celles situées à la surface de la substance à dissoudre, ce qui provoque la libération progressive de ces dernières au sein du liquide; cette libération est d'autant plus rapide que les molécules du liquide percutent avec une grande vitesse celle de la substance à dissoudre.
<i>Observation : le chauffage de l'eau pure produit une augmentation de la température jusqu'à 100°C qui est suivi de l'ébullition de l'eau à une température constante de 100°C.</i>	L'augmentation initiale de la température s'interprète par une augmentation de l'agitation des molécules. L'ébullition se produit sans élévation de la température car l'énergie reçue par l'eau est utilisée pour rompre les liaisons intermoléculaires qui lient les molécules dans l'état liquide.
<i>Observation : le palier de température de l'alcool pur lors de son ébullition se produit à 79°C.</i>	Les molécules d'alcool à l'état liquide sont moins liées que les molécules de l'eau à l'état liquide, ce qui explique sa volatilité plus importante. La température d'ébullition ne dépend que de la nature de la substance (et de la pression atmosphérique).

Tableau 14 : Résumé des connexions entre modèle moléculaire et phénomènes physiques établies depuis le début de l'année

Au moment où commence la partie observée, les élèves ont donc à leur disposition :

- Un modèle moléculaire enrichi : c'est ce que nous appellerons la référence de premier niveau.
- Une palette étendue d'exemples d'application de ce modèle à divers phénomènes simples tels que la diffusion, la conduction et dilatation thermiques, l'ébullition, etc. : c'est ce que nous appellerons la référence de second niveau.

Contextualisation locale (à l'échelle de la séance)

Esther entame l'étude de l'évaporation en problématisant le phénomène. Avec l'aide des élèves, elle soutient que les flaques d'eau s'évaporent, sans pour autant atteindre la température de 100°C propre à l'ébullition, phénomène qui vient d'être étudiée en détail, notamment au niveau microscopique (cf. Tableau 14, p. 237). Esther engage ainsi la différenciation entre deux types de vaporisation aux caractéristiques différentes : l'ébullition, qui ne se produit qu'une fois la température de 100°C atteinte et l'évaporation, qui est susceptible de se produire à température ambiante. Elle amorce la construction d'un questionnement scientifique : le fait que l'évaporation soit de nature différente de l'ébullition conduit à la nécessité de trouver une interprétation microscopique qui lui soit spécifique.

L'activité qu'elle propose ensuite est structurée autour de trois tâches correspondant aux parties encadrées en pointillés de la fiche d'activité (cf. Figure 34) : « Observations », « Explication microscopique » et « Quels sont les facteurs qui influencent l'évaporation ? » :

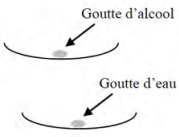
<p style="text-align: center;">De l'eau et de l'alcool dans un verre...</p> <p>Description de l'expérience :</p> <ul style="list-style-type: none">• Une goutte d'alcool est déposée dans un verre de montre.• Une goutte d'eau est déposée dans un autre verre de montre. <div style="text-align: center;"></div> <p style="text-align: center;">Observations</p> <p>20 minutes après, voici ce que j'ai pu observer.</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p style="text-align: center;">Explication microscopique</p> <p>Voici une explication microscopique de ce phénomène :</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>.....</p>	<p style="text-align: center;">L'évaporation</p> <p>Après un orage, les routes mouillées finissent par sécher. L'eau est passée de l'état liquide à l'état gazeux en devenant de la vapeur. Elle s'est donc vaporisée mais, cette fois, par évaporation et non pas par ébullition.</p> <p>Contrairement à l'ébullition qui ne commence qu'à une température précise, l'évaporation est : Une vaporisation naturelle et lente qui se produit à toute température.</p> <p style="text-align: center;">Quels sont les facteurs qui influencent l'évaporation ?</p> <p>Voici les facteurs sur lesquels il est possible d'agir facilement pour augmenter la vitesse d'évaporation d'une quantité donnée de liquide.</p> <p>Facteur 1 :</p> <p>.....</p> <p>Facteur 2 :</p> <p>.....</p> <p>Facteur 3 :</p> <p>.....</p> <p>Facteur 4 :</p> <p>.....</p>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Figure 34 : La fiche distribuée aux élèves (recto à gauche et verso à droite)

Pour la première tâche « Observations », Esther a distribué à chacun des groupes deux verres de montre sur lesquels étaient déposées une goutte d'alcool et une goutte d'eau. Elle a demandé aux élèves de noter leurs observations immédiatement après le dépôt de la goutte puis quelques minutes plus tard. Après un temps de travail en groupe, une discussion collective a mené aux constats suivants :

- Il existe une différence de forme entre les deux : la goutte d'eau est davantage bombée que la goutte d'alcool.



Figure 35 : La goutte d'eau et d'alcool dessinées au rétroprojecteur par Esther

- Au bout de quelques minutes, la goutte d'alcool s'est évaporée, c'est-à-dire transformée en gaz. Cette évaporation s'est effectuée à température ambiante. L'eau va s'évaporer aussi, mais plus lentement que l'alcool.

Esther demande ensuite aux élèves d'expliquer le mécanisme de l'évaporation au niveau moléculaire, éventuellement en s'aidant de la différence de comportement de la goutte d'eau et de la goutte d'alcool. C'est à ce moment que commencent les phases étudiées.

9.4.2 Analyse a priori des milieux primitifs mis en place par l'enseignante

Il est possible de considérer qu'il existe deux milieux primitifs, l'un précédant la première phase étudiée (N21f) et l'autre précédant les dernières phases étudiées (N22b) et (N22c).

Premier milieu primitif (avant la phase N21f)

Les élèves sont censés expliquer le mécanisme de l'évaporation au niveau moléculaire, en s'aidant de la différence de comportement de l'eau et d'alcool.

Face à cette tâche, les objets produits par les élèves sont possiblement restreints par plusieurs facteurs :

- D'abord, le premier étage de la modélisation a été posé : la disparition de la goutte d'alcool (et pour finir, de la goutte d'eau) correspond à un changement d'état, l'alcool (ou l'eau) passant de l'état liquide à l'état gazeux. Cette restriction préalable du milieu exclut toutes les explications qui feraient intervenir une absorption du liquide par son support, par exemple. Faire réfléchir les élèves sur la transition liquide-gaz et non directement sur la disparition apparente des gouttes est une façon de contraindre les objets susceptibles d'émerger au sein des groupes. D'autre part, l'expérience que propose Esther comme base de réflexion (les deux gouttes sur les verres de montre) est suffisamment épurée pour orienter le regard des élèves sur un nombre de facteurs limités (la goutte elle-même, l'air environnant, le verre de montre), susceptibles d'avoir un rôle dans le phénomène d'évaporation. Le milieu primitif est réduit et mis en scène de manière à focaliser la nature des rapports aux objets du milieu que les élèves peuvent potentiellement construire.

- Ensuite, il ne s'agit pas de créer de toutes pièces un modèle moléculaire mais d'enrichir sa dernière version en faisant en sorte qu'elle prenne en compte les nouveaux faits mis au jour, c'est-à-dire une transition liquide-gaz (l'évaporation) qui se déroule sans atteindre une température spécifique (comme l'ébullition). À ce stade, la structure « cyclique » de l'avancée des savoirs, caractéristique de la séquence sur les propriétés de la matière, a posé les jalons de routines ancrées en profondeur dans la classe : en particulier, les élèves savent que, pour enrichir davantage le modèle moléculaire, ils doivent obligatoirement prendre en compte les éléments déjà institutionnalisés à son propos (la référence de premier et de second niveau) : nous appellerons l'ensemble de ces éléments la référence déjà-partagée.

Ces caractéristiques du milieu primitif et du contrat didactique en vigueur assurent que les rapports aux objets construits par les élèves seront plutôt focalisés ; peut-être certains élèves seront-ils à même de redécouvrir certains traits pertinents relatifs au mécanisme microscopique de l'évaporation. Néanmoins, parvenir à l'idée que les molécules du liquide rompent leurs liaisons, non grâce à un surplus d'agitation (comme lors de l'ébullition) mais parce que certaines d'entre elles (celles qui sont à la surface) sont moins liées que les autres (pour une agitation équivalente) nécessite un effort d'imagination important : étendre à ce point le modèle moléculaire semble difficile, même pour des élèves habitués à cet exercice.

Second milieu primitif (avant les phases N22b et N22c)

Le modèle moléculaire de l'évaporation vient d'être institutionnalisé : « les molécules à la surface du liquide ont moins de liaisons intermoléculaires que les autres ; l'agitation de certaines peut être suffisante pour leur permettre de briser leurs liaisons et de s'échapper du liquide ». Esther demande alors aux élèves de décanter les facteurs d'accélération de l'évaporation en s'aidant de la convocation des conditions idéales pour sécher le linge à la maison, d'une part, et de développer les raisons microscopiques pour lesquelles ces facteurs accélèrent effectivement l'évaporation.

Dans le premier exercice, il s'agit de reconnaître ces facteurs (chaleur, surface en contact avec l'air, vent, pression) à partir du souvenir des gestes familiers pour faire sécher le linge (l'étendre, le placer au Soleil, utiliser un sèche-linge, etc.). Deux difficultés se posent alors :

- Certains usages familiers combinent le recours à plusieurs facteurs simultanément : par exemple, le sèche-cheveux utilise le vent et la chaleur pour évaporer l'eau des cheveux ; étendre le linge au Soleil fait appel à la chaleur, à la surface en contact avec l'air, et éventuellement le vent, etc. Les élèves doivent donc séparer les facteurs à l'œuvre derrière une même situation, ce qui n'est pas trivial mais reste cependant accessible aux élèves de cette tranche d'âge (14-15 ans).
- Le facteur « pression » n'est pas mis en œuvre dans la vie quotidienne pour accélérer le séchage du linge. Si l'enseignante décide de conserver cet enjeu, il semble nécessaire qu'elle introduise certains objets dans le milieu, par exemple, à travers l'évocation

d'expériences (le linge sèche plus vite en altitude qu'en plaine²⁰, tout autre facteur étant égal par ailleurs) ou le recours à la mémoire didactique (sous la cloche à vide, la goutte d'alcool disparaît encore plus vite qu'à l'air libre). D'autre part, la pression est un facteur de décélération de l'évaporation (augmenter la pression diminue le taux d'évaporation) tandis que les autres sont des facteurs d'accélération de l'évaporation (augmenter la chaleur, le passage du vent, la surface en contact avec l'air augmente le taux d'évaporation). Cette subtilité entraîne la nécessité d'une prise en charge différenciée entre les quatre facteurs afin d'éviter toute ambiguïté.

Le second exercice est un exercice d'application du modèle moléculaire de l'évaporation fraîchement institutionnalisé à des faits empiriques connus. Ce n'est pas un exercice d'enrichissement d'un modèle, comme dans la tâche précédente : la responsabilité des élèves s'en trouve allégée. De leur point de vue, il s'agit de construire des liens entre les facteurs d'accélération (chaleur, vent, pression, surface en contact) et le modèle moléculaire de l'évaporation : par exemple, la surface en contact avec l'air accélère l'évaporation parce que plus la surface est grande, plus il y a de molécules peu liées (qui ne se trouvent qu'en surface) susceptibles de rompre leurs liaisons. Nous ne développons pas le raisonnement de nouveau mais comme précédemment, la référence déjà-partagée (dans laquelle se trouve maintenant le modèle moléculaire de l'évaporation) agit comme une contrainte vis-à-vis des rapports aux objets que les élèves peuvent construire. Au final, les caractéristiques du milieu primitif et du contrat didactique en vigueur autorisent un accès à la tâche à la portée de ces élèves : avec les ressources dont ils disposent, ceux-ci sont en mesure de redécouvrir certains traits pertinents relatifs à l'interprétation microscopique des facteurs d'accélération de l'évaporation. Parallèlement, le travail de régulation de l'enseignante s'en trouve facilité.

9.4.3 Analyse de la phase N21f : Discussion des hypothèses et adoption d'un modèle moléculaire de l'évaporation

Face à la demande de l'enseignante, les élèves ont travaillé en duo afin d'expliquer l'évaporation au niveau moléculaire. Lors de la mise en commun, Esther demande à chaque duo de rapporter ses idées. Nous nous concentrons sur le traitement de la proposition de Caroline et Selma.

Extrait E1 : La modélisation de l'évaporation par Caroline et Selma

- | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>643. <i>Ens</i> : Sel et Car vous avez évoqué quelque chose quand je suis passée/ quelle était votre première piste↑</p> <p>644. <i>Car</i> : ben moi je pensais que c'était le/ les molécules de/ genre l'air et tout ce qui a autour de la goutte qui faisaient bouger la goutte/ enfin qui qui/ voilà (fait un geste difficile à interpréter)</p> <p>645. <i>Ens</i> : alors là on va juste pas voir/ qu'est-ce que tu voulais dire par ça↑ (reproduit le geste)</p> <p>646. <i>Car</i> : non mais c'est genre que/ elles frappent/</p> <p>647. <i>Sel</i> : cognent</p> <p>648. <i>Car</i> : [ouais cognent</p> <p>649. <i>Ens</i> : [ouais utilise le monde frapper c'est bien/ le mot frapper</p> <p>650. <i>Car</i> : et la goutte [d'alcool] vu qu'elle a moins de liaisons (xxx)/ elle a moins de liaisons/ eh ben en bougeant le truc ben ça se pfffiou (fait un geste de séparation)</p> <p>651. <i>Ens</i> : donc tu voudrais dire que les molécules se séparent/</p> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

²⁰ Dans la référence déjà-partagée, se trouve l'idée que l'air se raréfie en altitude, idée introduite lors de l'étude de la pression.

652.Car : ouais

653.Ens : d'accord/ ok/ alors c'est une première bonne hypothèse/ Aly et Wil sont venus à peu près aussi là-dessus/ en tout cas je les ai entendues évoquer cette première hypothèse/ c'est-à-dire que/ heu on aurait des molécules autour qui viennent frapper et puis qui viennent arracher au fur et à mesure des molécules du liquide/ très bien

Extrait E1 : La modélisation de l'évaporation par Caroline et Selma - S1 [(1:11:30) - (1:12:30)]

Analyse [méso/topo/chronogénèse]

Esther oriente la discussion en demandant au groupe Caroline et Selma de rappeler la « piste » qu'elles suivaient à propos de l'interprétation microscopique du phénomène d'évaporation (TdP 643). Caroline introduit l'objet : « les molécules de (...) l'air (...) autour de la goutte [font] bouger la goutte » (TdP 644). Dès l'introduction de cet objet dans le milieu, Esther organise une expansion mésogénétique et un ralentissement chronogénétique afin de permettre à la proposition de Caroline et Selma de se développer et de prendre une place dans le milieu. Esther prend une posture d'accompagnement afin d'aider à sa reformulation (« qu'est-ce que tu voulais dire par ça », TdP 645 ; « ouais utilise le mot frapper », TdP 649 ; « donc tu voudrais dire que les molécules se séparent », TdP 651), ce qui permet à Caroline de compléter sa proposition en amenant de nouveaux objets (« [les molécules] frappent », TdP 646 ou « cognent », TdP 547 ; « la goutte [d'alcool] a moins de liaisons », TdP 650 ; fait un geste de séparation, TdP 650). L'enseignante regroupe la proposition de Caroline et Selma avec celle d'Alyson et William et synthétise son évolution par l'objet suivant : « Les molécules [d'air] autour viennent frapper et puis viennent arracher au fur et à mesure des molécules du liquide » (TdP 653).

Interprétation de l'Extrait E1

Nous résumons l'idée de Caroline et Selma par la proposition suivante : l'évaporation s'explique par le fait que les molécules présentes dans l'air viennent percuter les molécules d'alcool, ce qui leur donne l'impulsion nécessaire pour briser leurs liaisons et les arracher du reste du liquide. Nous l'appelons la proposition « Collisions ».

D'abord, nous donnons quelques caractéristiques de la gestion topogénétique d'accompagnement que prend Esther afin de diffuser la proposition « Collisions » :

- Esther participe à la reformulation des objets introduits par les élèves. Il s'agit d'une régulation minimale qui prend racine dans les nombreuses confusions entre les niveaux microscopique et macroscopique dont Caroline fait preuve par le biais des objets qu'elle introduit. Elle soutient notamment que « les molécules d'air [font] bouger la goutte » (TdP 643) et que « la goutte a moins de liaisons » (TdP 650). La goutte étant macroscopiquement au repos et sans liaison apparente, elle se réfère probablement aux molécules présentes dans la goutte, c'est-à-dire aux molécules d'alcool. Ce sont ces difficultés d'échelle qui motivent probablement Esther à effectuer une première série de régulations (TdP 645, 645, 651) afin de s'assurer que la proposition diffusée auprès de la classe soit a minima compatible avec les standards de la référence déjà institutionnalisée.

- Esther rapproche la proposition du groupe de Caroline et Selma avec celle du groupe Alyson et William. Lors des travaux de groupe, Esther est passée dans les rangs pour recueillir les idées des élèves, et l'échange suivant a eu lieu :

620.Ens : *(au groupe Alyson/William) maintenant il va falloir expliquer l'évaporation*
621.Wil : *ben c'est que l'air ça frappe (...) comment dire/ les molécules d'air ben vu que ça arrête pas de frapper les molécules d'alcool/ vu qu'elles sont moins soudées que les molécules d'eau*
622.Ens : *mmm*
623.Wil : *c'est plus facile à/ donc enlever les molécules d'alcool/ et donc ça s'évapore plus vite que l'eau*
624.Ens : *pas mal/ pas mal/ c'est un bon départ*

Extrait E2 : la proposition d'Alyson et William - S1 [(1:09:30) - (1:10:30)]

La proximité de ces deux idées engage donc l'enseignante à les regrouper sous une synthèse commune : dans les deux scénarios, l'évaporation trouve directement son origine dans les collisions entre les molécules de l'air et les molécules d'alcool. Ces 4 élèves (sur 10, rappelons-le) ont réussi à s'engager dans la situation de modélisation proposée par l'enseignante, puisqu'ils intègrent dans leur action/discours le niveau microscopique. Cela explique que l'enseignante accorde du temps au développement de cette proposition (expansion de la mésogenèse ; accompagnement topogénétique ; ralentissement chronogénétique) : en tout, 16 tours de parole (sur 43) sont dévolus au traitement de la proposition « Collisions ».

Nous explorons à présent les caractéristiques de la proposition « Collisions » en faisant ressortir les indices par lesquels les élèves ont construit du sens et interprété la situation dans laquelle ils étaient placés. Pour construire et soutenir la proposition « Collisions », les élèves ont fait appel à plusieurs éléments de la référence déjà-partagée :

- Les élèves utilisent les spécificités de la référence déjà-partagée de premier niveau, c'est-à-dire le modèle moléculaire enrichi : les molécules de l'air (donc, de gaz) se déplacent rapidement dans toutes les directions (puisque'elles peuvent venir « frapper les molécules d'alcool », TdP 621) ; dans un liquide, les molécules sont liées entre elles (« [les molécules d'alcool] sont moins soudées que les molécules d'eau », TdP 621).
- Les élèves utilisent également les spécificités de la référence déjà-partagée de second niveau, c'est-à-dire les exemples paradigmatiques d'application du modèle moléculaire lors de l'interprétation d'autres phénomènes. Parmi ces exemples d'application, deux méritent d'être développés ici car leur proximité avec la proposition « Collisions » nous semble éclairante.
 - La rupture des liaisons entre les molécules d'alcool que prône la proposition « Collisions » se retrouve telle quelle dans la modélisation du phénomène d'ébullition qui vient d'être menée dans la classe. En effet, l'étude de l'ébullition a permis de donner une explication au fait que la vaporisation s'accompagne d'une stagnation de température : l'énergie reçue par l'eau est utilisée pour rompre les liaisons intermoléculaires qui lient les molécules dans l'état liquide (cf. Tableau 14, p. 237). Puisque les deux phénomènes traitent d'une vaporisation, il semble légitime d'induire qu'elles mettent en jeu les mêmes mécanismes : la rupture de liaisons intermoléculaires.

- L'idée que les collisions entre deux types de molécule entraînent une dispersion du premier type au sein du second, idée que prône la proposition « Collisions » se retrouve dans la modélisation microscopique du phénomène de dissolution d'un solide à l'intérieur d'un liquide. Lors de l'étude de la dissolution précédemment menée, il a été établi que les molécules du liquide percutent celles situées à la surface de la substance à dissoudre, ce qui provoque la libération progressive au sein du liquide (cf. Tableau 14, p. 237). Les connexions entre l'évaporation et la dissolution paraissent, a priori, assez importantes : dans les deux cas, les molécules d'une substance (l'alcool liquide lors de l'évaporation, le sucre solide lors de la dissolution) s'éparpillent au sein des molécules d'une autre substance (l'air lors de l'évaporation, l'eau lors de la dissolution), ce qui entraîne la non-perceptibilité macroscopique de la première.

Les éléments de la référence déjà-partagée (de premier niveau et de second niveau) ont une influence considérable sur la nature des objets produits par les élèves : ils agissent comme des contraintes sur les possibles des propositions imaginées par les élèves. Ils leur permettent de découvrir certains traits pertinents à la modélisation du phénomène d'évaporation (rupture des liaisons intermoléculaires des molécules de surface) mais aussi de considérer comme pertinents des éléments qui ne le sont pas (les collisions entre les molécules de l'air et les molécules d'alcool comme origine directe de la rupture des liaisons). En effet, l'action de l'air, par les chocs aléatoires et désordonnés de ses molécules avec les molécules d'alcool joue au contraire un rôle de « couvercle » dans le phénomène d'évaporation. Du point de vue des élèves, la partie difficile reste donc de reconnaître quels sont les indices pertinents de la référence déjà-partagée sur lesquels s'appuyer. La légitimité de fonder son explication sur une analogie avec un phénomène plutôt qu'un autre est un savoir délicat, et peu explicité en pratique.

Indépendamment de ces considérations, les élèves sont parvenus à modéliser le phénomène d'évaporation puisque la proposition « Collisions » fait appel à certains modèles (les états de la matière, l'évaporation, le modèle moléculaire, etc.), à certains phénomènes (la disparition de la goutte d'alcool), et aux connexions entre les deux (la disparition de la goutte d'alcool est dû aux collisions entre certaines molécules, etc.). D'autre part, un cadre théorique et expérimental important (la référence déjà-partagée) constitue la trame de fond du raisonnement des élèves. Ces aspects de la situation nous permettent de considérer que la proposition « Collisions » équivaut à une hypothèse, au sens fort que l'épistémologie donne à ce terme. C'est d'ailleurs le terme qu'utilise Esther pour qualifier les objets apportés par les élèves (TdP 653). Il semble important de souligner qu'à nos yeux, la proposition « Collisions » n'est pas une hypothèse, tel que les scientifiques en imaginent régulièrement dans leurs pratiques mais **équivaut** à une hypothèse : l'hypothèse « scolaire » est toujours le résultat d'un processus de transposition didactique opéré à partir d'une pratique scientifique. Nous y reviendrons dans la discussion.

Nous explorons à présent, comment, dans la suite de la discussion collective, l'enseignante gère la proposition « Collisions » et installe un modèle privilégiée de l'évaporation.

Extrait E3 : Invalidation de la proposition de Selma et Caroline et établissement du modèle de l'évaporation

625.Ens : la première chose c'est de savoir si/ votre hypothèse (en montrant groupes Car/Sel et Aly/Wil)/ vous l'avez évoqué aussi (à Dia?)/ les molécules d'air qui viennent taper sur le liquide est correcte/ alors pour faire ça/ quelle expérience pourrait être faite↑

626.Car : la cloche à truc là

627.Mat : la cloche à vide

628.Car : voilà

629.Ens : exactement/ on pourrait mettre sous une cloche à vide/ heu là je l'ai pas avec moi/ parce que c'est un autre prof qui l'utilisait/ donc je peux vous le dire/ y a une sacrée évaporation sous cloche à vide aussi/ c'est même/ ça va même 5 fois ou 10 fois plus vite que à l'air ambiant/ donc en fait malheureusement on n'y est pas/ c'est pas/ en tout cas pas que/ disons que ça peut influencer d'une certaine manière les molécules qui viennent frapper mais on va voir que c'est pas tout à fait ça/ donc ce n'est pas ça/ c'est vraiment interne au liquide/ c'est interne à ce qui se passe dans le liquide/(...) faisons un zoom dans la matière ici/ je vais dessiner quelques molécules d'un des deux liquides/ c'est égal d'ailleurs/ si vous voulez/ d'alcool↑/ d'accord/hop// exceptionnellement je vais dessiner les liaisons/ normalement on le fait pas/ d'accord↑/ je vais dessiner les liaisons/ comment je pourrais les dessiner↑

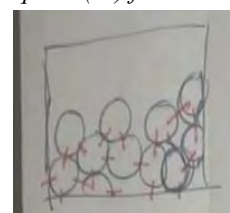


Figure 36 :
Représentation des liaisons (traits rouges) des molécules d'un liquide

630.El : un trait

631.Ens : un petit trait

632.Esp : qui les relie

633.Ens : ouais/ un petit trait qui les relie/ alors faisons ça/ et puis on va dire que à chaque fois qu'elles sont en contact les unes avec les autres/ eh ben y a une liaison/ d'accord↑/ on va faire ça comme ça/ là/ là/ là (dessine)/ puis y en a dessous évidemment aussi/ il doit y en avoir une comme ça/ là aussi/ ici / ouais sûrement/ là y en aura ici aussi de côté parce qu'il faut// mmm ici aussi/ voilà on y est à peu près/ d'accord/(...) alors prenez cette molécule-là/ mmm là/ celle-ci/ de base/ celle-là par exemple/ et encore/ elle en a trois/ et puis celle-ci/ ou bien/ là haut/ elle en a combien↑

634.El : deux

635.Ens : une ou deux

636.El : ah plus c'est dehors plus c'est (...)

637.Ens : ok/ à la surface d'un liquide les molécules sont moins liées qu'à l'intérieur d'un liquide/ ça ça va↑/ facile la démonstration↑

638.Cha : mais c'est parce que y en aaaa/ y en a des en-dessous et au-dessus/et là celles qui sont au-dessus/ y en a pas au-dessus

639.Ens : exactement/ donc on a des molécules qui de base sont moins liées dans un liquide/ c'est celles qui se trouvent à la surface// à la surface d'un liquide vous avez des molécules moins liées(...)/ qu'est-ce qu'on peut dire de l'agitation↑

640.Car : pareil

641.Ens : exactement/ elle est identique/ donc à partir du moment où on a des molécules qui sont liées différemment/ celles de la surface sont moins liées que celles à l'intérieur/ et que l'agitation est à peu près pareil partout/ quoique on va voir que c'est pas tout à fait vrai/ eh bien/ qu'est-ce qui empêche les molécules un petit peu plus agitées de quitter la surface à un moment ou à un autre↑/ si tout à coup elles ont assez d'énergie/ si elles ont assez d'agitation

642.Mat : ben rien

643.Ens : ben rien exactement/ et c'est ce qu'il se passe// cette molécule-là par exemple/ celle qui est à l'intérieur/ elle peut avoir une certaine agitation/ mais/ vu qu'elle est relativement liée avec le reste des molécules/ elle est dedans/ eh ben cette agitation n'est pas suffisante pour briser ses trois liaisons/ par contre les molécules qui doivent se retrouver à la surface/ qui se retrouvent avec une deux peut-être trois liaisons grand maximum/ disons moins en tout cas/ peuvent avoir pour une énergie équivalente/ pour une agitation équivalente/ la possibilité de sauter hors du liquide/ donc d'avoir brisé ses liaisons/ et de sortir/ et au fur et à mesure qu'il y a des molécules qui sortent eh bien y a quel phénomène↑/ quel changement d'état↑

644.El : (xxx)

645.El : (xxx)

646.Ens : voilà/ alors on passe dans un gaz/ ça s'appelle une vaporisation/ et c'est ça le phénomène d'évaporation/ l'évaporation c'est des molécules qui vont sortir de votre liquide au fur et à mesure/ et ça se fait à la surface ce phénomène/ ce sont les molécules qui sont moins liées à la surface de votre liquide/

chaque fois que vous avez une molécule un petit peu plus agitée qui passe à la surface/ elles peuvent avoir la possibilité de briser leurs liaisons

Extrait E3 : Invalidation de la proposition de Selma et Caroline et modèle de l'évaporation - S1 [(1:15:30) - (1:16:30)]

Analyse [méso/topo/chronogène]

Esther oriente la discussion sur l'identification d'un moyen expérimental afin de déterminer si l'hypothèse de Caroline, Selma, Alysson et William est correcte (« quelle expérience pourrait être faite », TdP 625). Caroline et Matthis introduisent l'objet « la cloche à vide » (TdP 626 à 628), que l'enseignante valide aussitôt (TdP 629). Elle prend alors une posture de surplomb topogénétique et injecte un objet majeur : « y a une sacrée évaporation sous cloche à vide aussi, ça va même 5 fois ou 10 fois plus vite qu'à l'air ambiant », TdP 629. Ce résultat lui permet d'invalider la proposition « Collisions » (« ce n'est pas ça », TdP 629) et de déplacer le raisonnement vers une cause de l'évaporation qui soit « interne au liquide » (TdP 629). En maintenant une posture topogénétique haute, elle représente les liaisons des molécules d'un liquide par un trait rouge (TdP 633) et oriente la discussion vers un trait pertinent du mécanisme de l'évaporation : le fait que les molécules de surface possèdent moins de liaisons intermoléculaires que les molécules à l'intérieur du liquide (« à la surface d'un liquide les molécules sont moins liées qu'à l'intérieur d'un liquide » ; TdP 638). Quelques élèves l'accompagnent dans ce raisonnement : Charlène affirme au TdP 639 que « [les molécules de l'intérieur] y en a des [liaisons] en-dessous et au-dessus et là celles qui sont au-dessus y en a pas au-dessus ». Esther utilise la mémoire didactique pour réintroduire l'idée que « l'agitation est à peu près pareil partout » au sein d'un liquide (TdP 642), notamment à l'aide de l'apport de Caroline (« pareil », TdP 641). Elle conclut en institutionnalisant l'objet suivant qui explique le mécanisme de l'évaporation : « les molécules à la surface du liquide ont moins de liaisons intermoléculaires que les autres ; l'agitation de certaines peut être suffisante pour leur permettre de briser leurs liaisons et de s'échapper du liquide ».

Interprétation de l'Extrait E3

Nous nous concentrons d'abord sur ce que fait Esther afin de gérer la proposition « Collisions » :

- Elle laisse la responsabilité aux élèves de lui soumettre un protocole expérimental qui permettrait de se prononcer sur la validité de la proposition « Collisions ». Caroline et Matthis évoquent la cloche à vide. Les élèves de cette classe ont déjà eu l'occasion de se confronter à cet instrument, notamment lors de l'introduction de la modélisation microscopique de la grandeur « pression » (cf. Tableau 14, p. 143). L'introduction de l'objet « cloche à vide » dans le milieu à ce moment-là montrent que ces élèves ont été capables d'établir des connexions entre les conditions spécifiques dans lesquelles la cloche à vide leur a été présentée et la situation actuelle de questionnement sur l'origine microscopique du phénomène d'évaporation. En particulier, la référence à cet instrument prouve qu'ils ont implicitement effectué tout ou partie du raisonnement suivant : la cloche à vide entraîne une raréfaction de l'air au-dessus de la surface de l'alcool et donc une diminution des collisions entre les molécules de l'air et d'alcool. Or, la proposition « Collisions » impute directement l'arrachement des molécules d'alcool hors du liquide à

ces collisions. S'il y a moins de collisions, l'évaporation devrait ralentir : la mise en route de la cloche à vide devrait donc aboutir à une goutte d'alcool qui reste plus longtemps intacte. Comme ce raisonnement fait (implicitement) appel à certains modèles (les états de la matière, l'évaporation, le modèle moléculaire, etc.), à certains phénomènes (la mise en route de la cloche à vide, la permanence de la goutte d'alcool), et aux connexions entre les deux (la mise en route de la cloche possède des conséquences au niveau de certaines entités théoriques comme les collisions entre molécules qui en retour explique certains phénomènes visibles, comme la permanence de la goutte d'alcool), il est possible d'affirmer que Caroline et Matthis se sont engagés dans une démarche de modélisation.

- Esther est alors en mesure d'organiser la contradiction entre la fonction de l'air tel que l'envisage la proposition « Collisions » et les résultats de l'expérience imaginée de la cloche à vide : puisque sous une cloche à vide, l'évaporation n'est pas ralentie mais au contraire accélérée, les molécules présentes dans l'air ne peuvent pas être à l'origine de l'évaporation directement²¹. La proposition « Collisions » est donc invalidée.

Dans ce processus d'invalidation de la proposition « Collisions », le rôle de la référence déjà-partagée est double : d'une part, comme dans l'extrait précédent, elle vient contraindre les possibles des objets produits par les élèves (la cloche à vide comme moyen expérimental). D'autre part, elle permet également de fournir des arguments de négociation de ces objets pour l'enseignante (contradiction entre la proposition « Collisions » et l'expérience imaginée de la cloche à vide). Au final, l'espace de négociation de l'enseignante est tel qu'elle peut agir sans provoquer de discontinuité majeure entre les objets apportés par les élèves et ceux qu'elle veut promouvoir dans le milieu.

Nous nous concentrons maintenant sur ce que fait Esther afin de construire le modèle de l'évaporation :

- Remarquons d'abord que l'arrière-plan du raisonnement d'Esther provient de la référence déjà-partagée : l'organisation des molécules d'un liquide (très rapprochées et désordonnées), la présence de liaisons entre les molécules d'un liquide, l'agitation moléculaire des liquides ne sont pas des caractéristiques inédites du point de vue des élèves (cf. Tableau 14, p. 237). Ces éléments vont de soi pour chacun des participants. Esther sollicite d'ailleurs souvent les élèves pour les réintroduire dans le milieu, par appel à la mémoire didactique.
- Elle s'appuie sur certaines caractéristiques de la proposition « Collisions » : pour transformer le liquide en gaz, les liaisons entre les molécules doivent nécessairement se rompre. Il ne s'agit alors plus que de déterminer l'origine de cette rupture.
- Elle introduit de nouvelles informations sur le modèle moléculaire : les liaisons entre molécules ayant une très courte portée, les molécules de la surface sont moins liées que

²¹ Lors de l'évaporation, les molécules d'alcool, pour que l'alcool garde une température constante, puisent pourtant bien leur énergie dans l'air environnant. C'est pour cette raison que l'enseignante conclut subtilement que « les molécules [d'air] qui viennent frapper peuvent influencer [l'évaporation] (...) mais que c'est pas tout à fait ça » (TdP 629)

les molécules à l'intérieur du liquide. Cet enrichissement du modèle moléculaire permet de conclure que la rupture entre les molécules du liquide provient du fait, qu'à agitation égale, les molécules de la surface ont moins de liaisons à rompre que les autres.

Au final, la perception par les élèves du surplomb topogénétique dont elle fait preuve est atténué par le fait qu'elle s'appuie sur des éléments précédemment institutionnalisés (la référence déjà-partagée de premier niveau) et sur des traits pertinents issus d'objets amenés par les élèves (les ruptures intermoléculaires déjà présentes dans proposition « Collisions »). L'introduction du modèle de l'évaporation provoque cependant une micro-discontinuité par rapport aux manières de penser microscopiquement l'évaporation qui était en cours jusque-là du point de vue des élèves.

Dans la suite, l'enseignante leur donne justement l'occasion d'exercer leur interprétation de ce modèle moléculaire de l'évaporation fraîchement introduit à travers un travail d'application à des faits anciennement connus : à partir de la convocation des conditions de séchage des vêtements, il s'agit de trouver les facteurs accélérant l'évaporation et de les expliquer au niveau moléculaire.

9.4.4 Analyse de la phase N22b: Recherche des facteurs d'évaporation et de leur explication au niveau des molécules

En se remémorant les conditions les plus favorables au séchage du linge, le duo Diane et Charlène s'attèle à trouver les facteurs d'accélération de l'évaporation d'une part, et à en rendre compte à l'aide du modèle moléculaire de l'évaporation, d'autre part.

Extrait E4 : Travail de Diane et Charlène sur l'interprétation microscopique des facteurs d'accélération de l'évaporation

647. Cha : le chaud/quand on met sur un radiateur

648. Dia : (xxx)/ la chaleur

649. Cha : (xxx)/après elles s'agitent plus vite/ elles brisent leurs liaisons plus vite et l'eau se transforme en gaz?

650. Dia : ouais/bon déjà on a la chaleur/ sinon on a quoi↑

651. Cha : ben

652. Dia : tu la (fait le geste de tordre un linge)

653. Cha : ah ben oui

654. Dia : ouais mais c'est pour qu'ils s'évaporent plus vite/

655. Cha : ouais non mais si tu la tords/ ça va juste enlever un peu d'eau

656. Dia : ça s'évapore pas/ pfff (...)

657. Cha : à part la chaleur je vois pas

658. Dia : le vent↑

659. Cha : ah ben oui/regarde le sèche-cheveux/ tu te sèches les cheveux avec un/ l'air

660. Dia : oui mais y a la chaleur et l'air

661. Cha : même si tu te sèches avec un sèche-cheveux froid ben quand même/ ben (rires)

662. Dia : donc/ oui mais comment tu veux expliquer ça↑

663. Cha : ben je sais pas

664. Ens : (s'approche du groupe Cha/Dia)

665. Cha : comment dire enfin genre/ genre le sèche-cheveux/ on se sèche les cheveux/ça fait genre de l'air/ comment expliquer ça↑/pour/ sécher au sèche-cheveux

666. Ens : avec vos propres mots/ c'est pas si mal/ mais est-ce que t'as vraiment un sèche-cheveux/ouais c'est vrai qu'à la piscine tu peux avoir des sèche-cheveux/ c'est vrai

667. Dia : non mais on peut mettre? le vent/ à la limite

668. Ens : ben voilà/

669. Cha : le vent/ [c'est juste le vent↑/ c'est tout↑
 670. Ens : [pourquoi vous utilisez pas ça↑/oui/le vent ça peut suffire/ par contre après l'explication au niveau microscopique faut la trouver encore/ faut imaginer en quoi le vent peut influencer
 671. Cha : ben les molécules du vent elles raclent sur la surface/ et du coup ça fait [(fait un geste d'arrachement)
 672. Ens : [oui du coup ça peut être une explication (s'éloigne)
 673. Cha : en gros si tu regardes? microscopiquement t'as genre/ les molécules du dessus qui frottent sur (xxx)
 674. Dia : ouais
 675. Cha : (xxx)
 676. Dia : non non non
 677. Cha : bon attends je vais déjà mettre/ en gros la chaleur et le vent//la chaleur et le vent (écrit) (...)
 678. Dia : heu troisièmement
 679. Cha : ben moi je vois pas de troisièmement/la chaleur/ le vent
 680. Dia : tu brûles la serviette
 681. Cha : ben/ tu peux pas le brûler/ après elle existe plus
 682. Dia : faut regarder les 4 éléments
 683. Cha : ah ouais les 4 éléments
 684. Dia : ben non
 685. Cha : la chaleur le feu le vent la Terre
 686. Dia : l'eau
 687. Cha : tu peux pas évaporer de l'eau avec de l'eau et avec de la Terre (rires)
 688. Dia : heu elle disait pas que si on faisait/ on mettait la cloche à vide/y avait/ elle s'évaporait plus vite↑ (Esther donne la suite de l'exercice comme devoir à la maison)
 689. Cha : ben moi je comprends pas pourquoi les/ ah mais regarde vu que dans les cloches/ dans les cloches à vide y a pas de molécules/ peut-être que justement les molécules qui sont au-dessus elles appuient donc au contraire/elles empêchent qu'elles partent/ du coup si y a pas de molécules eh ben du coup y a rien qui appuie dessus/ du coup elles partent plus vite/ j'en sais rien/ c'est une idée
 690. Dia : ouais parce que ça reste ensemble ? mais/ heu/ ouais/ (parles des devoirs)

Extrait E4 : Travail de Diane et Charlène sur l'interprétation microscopique des facteurs d'accélération de l'évaporation- S1
 [(1:20:30) - (1:25:30)]

Analyse [mésoto/chronogénèse]

En l'absence d'Esther, les objets qui apparaissent dans le milieu ainsi que les rapports aux objets ne peuvent pas être institutionnalisés : au maximum, les élèves s'accordent sur leur sens et leur importance et ceux-ci font localement référence partagée. C'est le cas de l'Extrait E4, dans lequel Charlène et Diane balayent ensemble une succession d'objets vis-à-vis desquels elles construisent de nouveaux rapports, au sein d'une topogénèse équilibrée. Nous nous concentrons donc sur l'analyse mésogénétique.

Du TdP 646 au TdP 650, les élèves construisent de nouveaux rapports à l'objet « le chaud » (TdP 646) ou « la chaleur » (TdP 647). Charlène justifie l'introduction de cet objet en évoquant la situation « quand on met [les vêtements mouillés] sur un radiateur » (TdP 646). Se développe rapidement une interprétation microscopique relative à cet objet : « [les molécules] s'agitent plus vite, elles brisent leurs liaisons plus vite et l'eau se transforme en gaz » (TdP 648).

Du TdP 651 au TdP 655, les élèves construisent des rapports à l'objet « tordre le linge », objet mimé par Diane au TdP 651. Charlène y voit un trait non-pertinent par rapport à la tâche : « si tu la tords, ça va juste enlever un peu d'eau [sous-entendu : liquide] » (TdP 654). Diane suit Charlène : « ça s'évapore pas, pff » (TdP 655). L'objet « tordre le linge » disparaît alors du milieu.

Du TdP 656 au TdP 675, les élèves construisent des rapports à l'objet « le vent », introduit par Diane au TdP 657. Charlène évoque en réponse le « sèche-cheveux » (TdP 658) mais Diane

oppose le fait que le sèche-cheveux fait intervenir deux facteurs : « la chaleur » et « l'air » (TdP 659). Charlène rétorque qu'un « sèche-cheveux froid » (TdP 650) est quand même efficace. Lorsque l'enseignante passe dans le groupe, Charlène soumet à son appréciation l'objet « le sèche-cheveux » et Diane l'objet « le vent ». Esther valide ce dernier (« ben voilà », TdP 667) et les oriente vers le but de l'exercice : « l'explication microscopique [du vent], faut la trouver encore » (TdP 669). Charlène introduit alors l'objet : « les molécules du vent elles raclent sur la surface et du coup ça fait (fait un geste d'arrachement) » (TdP 670). Esther encourage cette voie de recherche (TdP 671).

Du TdP 676 au TdP 686, les élèves cherchent un troisième facteur (TdP 677, 678). Diane amène l'objet : « tu brûles la serviette » (TdP 679). Bien que cet objet entre en contradiction avec celui amené par Charlène juste après (« tu peux pas la brûler, après elle existe plus », TdP 680), Diane développe son idée : « faut regarder les 4 éléments » (TdP 682). Charlène les liste : « la chaleur le feu le vent la Terre » (TdP 684). Après l'introduction de l'objet « tu peux pas évaporer de l'eau avec de l'eau ou de la Terre » par Charlène, les deux élèves abandonnent cette piste.

Du TdP 687 au TdP 689, les élèves construisent des nouveaux rapports à l'objet « expérience de l'évaporation sous la cloche à vide ». Diane, au TdP 687, rappelle que l'eau s'évaporerait plus vite sous une cloche à vide. Après quelques hésitations, Charlène développe une interprétation microscopique relative à cet expérience à travers l'objet suivant : « dans les cloches à vide y a pas de molécules ; peut-être que justement les molécules qui sont au-dessus elles appuient donc elles empêchent qu'elles [les molécules du liquide] partent ; du coup si y a pas de molécules, y a rien qui appuie dessus, du coup elles partent plus vite » (TdP 648).

Les élèves sont censés continuer ce travail à la maison avant la discussion collective qui a lieu la séance d'après.

Interprétation de l'Extrait E4

La dynamique de la discussion de ce duo ne subit aucune désorganisation et suit une mécanique bien rodée : un potentiel facteur d'accélération de l'évaporation est soumis par l'une ou l'autre des élèves ; le cas échéant, un débat s'installe quant à sa pertinence et quelques arguments sont échangés ; si le facteur est reconnu comme pertinent, une interprétation microscopique est proposée, souvent à l'initiative de Charlène ; sinon, le débat est clos et les élèves passent à un autre potentiel facteur d'accélération de l'évaporation. Le caractère ordonné de la discussion témoigne du milieu et des enjeux communs que parviennent à se donner les deux élèves, mais aussi de la confiance partagée dans le fait que les rapports aux objets qu'elles développent répondent aux attentes de l'enseignante, confiance renforcée par le fait que celle-ci leur donne un retour positif sur la pertinence d'un de ces objets.

Charlène et Diane mettent au jour trois facteurs d'accélération de l'évaporation et imaginent des mécanismes microscopiques pour chacun d'entre eux :

- La chaleur pousse les molécules à s'agiter davantage et donc à briser leurs liaisons plus facilement : l'eau liquide s'évapore alors plus rapidement.

- Le vent accélère l'évaporation car « les molécules du vent raclent sur la surface du liquide et arrachent ses molécules ».
- Les molécules au-dessus du liquide « appuient sur sa surface et empêchent que les molécules du liquide s'échappent ». Sans molécule au-dessus, les molécules du liquide partent plus rapidement, ce qui veut dire que le liquide s'évapore plus vite²².

Pour construire ces rapports aux objets, les élèves s'inspirent des connaissances familières sur les conditions favorables au séchage du linge. Mais surtout, les élèves utilisent les caractéristiques de la référence déjà-partagée de premier et de second niveau (y compris des éléments du modèle de l'évaporation qui vient juste d'être institutionnalisé) : les molécules de l'air se déplacent rapidement dans toutes les directions ; la température est le reflet de l'agitation moléculaire ; sous une cloche à vide, l'évaporation est accélérée ; les molécules de l'air exercent des chocs contre la surface du liquide, ce qui correspond à une pression contre la surface, etc. Tous ces rapports aux objets sont remobilisés plus ou moins directement dans le discours des élèves. Le poids de la référence déjà-partagée (et l'habitude d'y puiser dedans régulièrement) est tel que la proportion de la discussion du duo qui repose sur d'autres références (le passage sur les 4 éléments) est marginale.

Les éléments précédemment institutionnalisés agissent donc comme des contraintes fortes sur les possibles des rapports aux objets créés par les élèves. Ils leur permettent de redécouvrir certains traits pertinents vis-à-vis de l'évaporation :

- la chaleur et le vent comme facteur de d'accélération de l'évaporation
- l'interprétation microscopique de la chaleur en tant que facteur d'accélération de l'évaporation
- une première approche de la différenciation entre le rôle de l'air statique comme facteur de décélération de l'évaporation (« les molécules au-dessus du liquide appuient sur sa surface et empêchent que les molécules du liquide s'échappent ») et le rôle de l'air en mouvement comme facteur d'accélération de l'évaporation (« les molécules du vent raclent sur la surface du liquide et arrachent ses molécules »).

Mais les élèves sont aussi amenées à considérer comme pertinents des éléments qui n'en sont pas (les frottements entre les molécules du vent et les molécules du liquide comme origine directe de la rupture des liaisons) : ces éléments, s'ils sont amenés à être diffusés au sein du collectif, nécessiteront une régulation de l'enseignante. Comme précédemment, puisque les élèves intègrent dans leur action/discours le niveau microscopique, nous pouvons conclure qu'elles se sont engagées dans une démarche de modélisation.

Dans la suite, nous nous intéressons particulièrement au devenir des rapports aux objets développés par Charlène et Diane dans la discussion collective.

²² Les confusions entre le niveau microscopique et le niveau macroscopique sont nombreuses dans l'explicitation du mécanisme par Charlène : en particulier, les molécules au-dessus du liquide n'appuient pas sur celui-ci, c'est le résultat de leurs multiples impacts qui crée une pression au niveau de l'interface liquide-air. Nous ne développons pas cet aspect dans la suite.

9.4.5 Analyse de la phase N22c : Discussion de l'interprétation microscopique des facteurs d'évaporation

La discussion collective met en commun les idées des élèves à propos de la nature des facteurs d'accélération de l'évaporation et de leur interprétation microscopique. Esther traite successivement chacun des facteurs d'accélération de l'évaporation : la chaleur, la surface en contact avec l'air, le vent, la pression. Nous nous intéressons aux trois derniers.

Extrait E5 : Traitement du facteur « surface en contact avec l'air »

112.Ens : allez quelqu'un que j'ai pas encore beaucoup entendu/ Dia↑/ parce qu'il me semble que t'as marqué plein de choses

113.Dia : heu moi j'ai mis la surface en contact avec l'air

114.Ens : hmm hmm/ super

115.Dia : ça voudrait dire par exemple de bien étendre le linge/ parce que si on le laisse en boule comme ça/ l'eau elle va rester heu/ en fait ça va faire une/ toute l'eau va être concentrée un peu à un endroit et puis/ alors du coup l'eau qui sera en surface/ on va dire comme ça/ y en aura/ elle mettra plus de temps/ enfin/ je sais pas/ j'arrive pas vraiment à expliquer/ mais toute l'eau pour qu'elle arrive/ pour que toutes les molécules arrivent en surface les uns après les autres ça mettra plus de temps

116.Ens : ouais/ y a vraiment quelque chose de bien là derrière/ effectivement la surface/ si vous prenez votre linge et que vous le roulez en boule vous savez bien qu'il va sécher/ allez 50 fois moins vite que si vous l'étendez/ ça c'est clair/ étendre le linge ça permet de le sécher/ ça vous le savez tous/ au niveau microscopique t'as commencé à évoquer la chose/ qu'est-ce qui/ qu'est-ce qui change↑/ si on a une surface petite ou une surface grande/ imaginons/on a un récipient (dessine ; cf. Figure 37)/ vous êtes pas obligés de dessiner/ c'est juste pour évoquer comme ça/ prenez un verre avec une certaine quantité d'eau/ ou vous prenez la même quantité d'eau/ mais vous la mettez dans un récipient beaucoup heu/ beaucoup plus plat/ où l'eau va/ donc du coup va avoir une surface libre/ en contact avec l'air beaucoup plus grande(...)

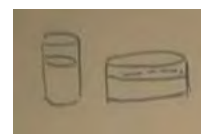


Figure 37 : Représentation au rétroprojecteur des deux récipients

117.Esp : les molécules sont moins liées

118.Ens : alors/ lesquelles↑/ de molécules/ qu'est-ce qu'on avait dit/ c'est lesquelles de molécules qui sont moins liées↑

119.Sel : celles qui sont à la surface/ elles sont en plus [davantage]

120.Ens : exactement/ donc ici imaginons alors/ je dis des chiffres au hasard/ imaginons qu'il y ait 10 milliards de molécules à la surface/ ça veut dire que là on a 10 milliards de molécules qui ont une certaine probabilité de briser leurs liens et de sortir/ donc qui participent directement à l'évaporation/ puis ici (montre le récipient plat) est-ce qu'il y en a plus ou moins↑

121.Els : plus [davantage]

122.Ens : voilà/ donc ça veut dire qu'il y a plus de molécules qui ont la probabilité/ qui ont une possibilité de sortir de ce liquide/ de briser leurs liaisons/ donc l'évaporation va se faire plus rapidement aussi/ d'accord↑/

Extrait E5 : Traitement du facteur « surface en contact avec l'air » - S2 [(0:12:00) - (0:14:30)]

Analyse [méso/topo/chronogénèse]

À la demande d'Esther (TdP 112), Diane introduit « la surface en contact avec l'air » (TdP 113), que l'enseignante reconnaît aussitôt comme un facteur valide d'accélération de l'évaporation (TdP 114). Diane développe son raisonnement : il faut « bien étendre le linge parce que si on le laisse en boule (...) l'eau mettra plus de temps pour que les toutes les molécules arrivent en surface les unes après les autres » (TdP 115).

À partir de ce moment, Esther se place dans une posture d'accompagnement et organise un ralentissement chronogénétique de l'action : elle confirme que le linge met beaucoup plus de temps à sécher en boule que lorsqu'il est étendu (TdP 116) ; elle illustre et généralise le propos de Diane en dessinant deux récipients, l'un dont la surface en contact avec l'air est plus grande

que l'autre (cf. Figure 37) ; elle fait appel à la mémoire didactique en rappelant ou en faisant rappeler aux élèves des éléments du modèle moléculaire de l'évaporation, notamment le fait que les molécules de la surface sont moins liées entre elles que les molécules au sein du liquide (TdP 117-119) ; elle fait conclure aux élèves que les molécules peu liées sont beaucoup plus nombreuses dans le récipient large que dans le récipient étroit (« celles qui sont à la surface, elle sont en plus [davantage] », TdP 119 ; TdP 120-121) ; elle conclut à travers l'introduction de l'objet suivant : « ça veut dire qu'il y a plus de molécules qui ont une possibilité de briser leurs liaisons donc l'évaporation va se faire plus rapidement » (TdP 122).

Interprétation de l'Extrait E5

Remarquons que le facteur « surface en contact avec l'air » que Diane met en avant dans cet extrait n'apparaît pas du tout dans le travail en duo de l'Extrait E4 : il résulte donc du travail à la maison de Diane effectué entre les deux séances.

Comme dans tous les extraits précédents, la proposition de Diane repose principalement sur des éléments de la référence déjà-partagée : en particulier, l'introduction des « molécules qui doivent arriver en surface les unes après les autres » est cohérente avec le modèle moléculaire qui impute l'origine de l'évaporation aux molécules de la surface. Il s'avère également qu'il s'agit d'un trait pertinent de l'interprétation microscopique de la surface en contact avec l'air, comme facteur d'accélération de l'évaporation.

Dans ces conditions de haute compatibilité entre le rapport à l'objet « surface en contact avec l'air » construit par Diane et le savoir visé, les gestes qui caractérisent la posture d'accompagnement que prend Esther dans cet extrait deviennent intelligibles. Ils visent à :

- transformer la proposition de Diane afin qu'elle devienne compatible avec les standards de la référence déjà-partagée (d'où le fait que l'objet « les molécules **arrivent** en surface » ne sera pas retenu, au bénéfice du dénombrement fictif du nombre de molécules en surface) ;
- passer du contexte du séchage du linge qui n'était qu'un prétexte pour décanter facilement les facteurs d'accélération à un contexte plus général d'étude du phénomène d'évaporation (d'où la comparaison effectuée sur le récipient étroit et le récipient large) ;
- organiser la diffusion de l'idée de Diane et aider les autres élèves à en percevoir la logique en les faisant se rappeler des caractéristiques du modèle moléculaire de l'évaporation (appel à la mémoire didactique) et participer au raisonnement mené sur les deux récipients (d'où le ralentissement chronogénétique qui intervient dès l'apparition de la proposition de Diane).

Comme précédemment, l'espace de négociation de l'enseignante est tel qu'elle peut opérer de façon continue entre l'objet apporté par Diane et celui institutionnalisé en fin d'extrait.

Extrait E6 : Traitement du facteur « le vent »

- 127.**Ens : Troisième facteur/ j'ai vu quelqu'un me dire quelque chose/alors je vais voir/ oui↑/ oui vas-y Car
- 128.**Car : du vent
- 129.**Ens : ouais le vent par exemple/le vent/ on va voir qu'on peut généraliser/ mais mettons vent déjà// et alors là pourquoi↑/ on va essayer de réfléchir ensemble/ qu'est-ce qui pourrait expliquer que le vent favorise la vitesse d'évaporation↑/ Cha
- 130.**Cha : ben vu que le/ le vent c'est des molécules un peu en/ des molécules qui se déplacent/ enfin/ enfin/ plus vite que le reste/ [enfin dans/parce que les autres/elles se déplacent plus (geste de déplacement)
- 131.**Ens : [oui de manière ordonnée/ ordonnée/ c'est pas toujours facile
- 132.**Cha : ouais/eh ben peut-être que genre en passant sur la surface elles arrachent plus facilement des molécules/ parce que vu qu'elles sont toutes ensemble/ enfin genre un gros bloc qui va comme ça (geste)/alors que s'il y a juste des molécules au bol
- 133.**Ens : oui
- 134.**Cha : enfin qui tapent au bol/ben c'est moins rapide/ et le vent ben ça/ en quelque sorte/ça/ c'est pas que ça les emporte/ mais ça tape d'un coup un peu/ ça les emporte plus vite/ enfin je sais pas comment dire
- 135.**Ens : oui donc tu tu/ tu verrais ça comme un mouvement qui vient arracher les molécules à la surface
- 136.**Cha : oui
- 137.**Ens : alors il pourrait/ y a un petit peu de ça/ mais disons que le facteur principal/ c'est pas qu'il y a un arrachement directement entre la surface et l'air/ mais qu'est-ce que ça pourrait être d'autre↑/(...)quand y a des molécules qui sortent de la surface du liquide/ si elles ont suffisamment d'énergie eh bien elles peuvent aller assez loin/ mais si elles en ont juste un tout petit peu plus/ rien n'empêche/ parce que leur mouvement/ faut imaginer qu'une fois qu'elles sont sorties elles font pas forcément un mouvement bien droit/ vers leee/ vers le haut/ non ça rien ne dit/ elles attrapent une agitation/ une certaine agitation/ on avait regardé quelle/ comment elles s'agitaient ces molécules de gaz↑/ les molécules d'un gaz elles s'agitent comment↑/ elles vont toutes vers le haut↑/ toutes veeers devant↑/
- 138.**Cha : dans tous les sens
- 139.**Ens : voilà/ elles sont tout le temps en train de s'agiter dans tous les sens/ de se cogner les uns aux autres/ donc certaines molécules qui sont sorties de l'eau là/ eh ben en fait de par leur mouvement/ si elles ont assez peu d'énergie/ elles vont retomber à la surface et refaire des liaisons/ d'ailleurs/ ça explique/ est-ce que j'ai une bouteille d'eau↑/(va chercher une bouteille d'eau avec un bouchon)//l'eau que j'ai enfermée dans cette bouteille/ si je reviens dans une semaine/ elle se sera évaporée↑
- 140.**Cha : non parce qu'il y a le couvercle
- 141.**Ens : ouais/(xxx) ça va pas s'évaporer/ enfin en fait y a de l'évaporation en permanence/ mais y a autant de molécules qui sortent du liquide/ qu'il y en a qui rentrent/ justement parce que y a pas moyen que ces molécules aillent dans leur environnement puisque j'ai mis un bouchon/ donc y en a qui sautent hors du liquide/ y a toujours de l'évaporation/ mais y en a aussi qui rentrent en permanence/ et là le phénomène est à l'équilibre/ y en a autant qui sortent que ce qui rentrent/ maintenant si j'ouvre ma bouteille et que je reviens dans une semaine/ qu'allez-vous observer↑
- 142.**Cha : ben y aura moins d'eau
- 143.**Ens : voilà/ y aura un peu moins d'eau/ donc y a une partie qui se sera réellement évaporée/ par rapport à la quantité que j'avais à l'origine/ et tout ça/ c'est parce qu'elles ont la possibilité de s'éloigner de la surface du liquide et de pas y retourner/ du coup le vent maintenant/ si sur cette surface après j'appliquais un courant d'air en permanence/ c'est pas que ça vienne arracher des molécules mais ça ferait que ça ↑
- 144.**Cha : elles retombent pas dedans
- 145.**Ens : exactement/ ça va les éloigner de la surface du liquide/ et faire qu'il y a moins de molécules qui vont retomber dedans au fur et à mesure

Extrait E6 : Traitement du facteur « le vent » - S2 [(0:18:00) - (0:24:30)]

Analyse [méso/topo/chronogène]

À la demande d'Esther (TdP 127), Caroline introduit « le vent » (TdP 128), que l'enseignante reconnaît aussitôt comme un facteur valide d'accélération de l'évaporation (TdP 129). Charlene, accompagné par l'enseignante, développe un raisonnement à son propos : « le vent c'est des molécules qui se déplacent plus vite que le reste » (TdP 130) ; « de manière ordonnée » complète Esther au TdP 131 ; « vu qu'elles sont toutes ensemble, un gros bloc qui va comme ça, elles arrachent plus facilement des molécules [du liquide] » (TdP 132) ; « alors que s'il y

juste des molécules qui tapent au bol c'est moins rapide » (TdP 134). Esther résume l'intervention de Charlène en introduisant l'objet : « c'est comme un mouvement qui vient arracher les molécules à la surface » (TdP 135).

À ce stade, l'enseignante sort de la posture d'accompagnement qu'elle avait tenue jusque-là pour basculer dans une posture de surplomb topogénétique qu'elle maintient jusqu'à la fin de l'extrait. Elle statue sur la validité du mécanisme microscopique développé par Charlène : « y a un petit peu de ça mais disons que le facteur principal c'est pas qu'il y a un arrachement directement entre la surface et l'air » (TdP 137) ; elle fait appel à la mémoire didactique en rappelant ou en faisant rappeler aux élèves que les molécules d'un gaz s'agitent dans tous les sens et se cognent les unes aux autres (TdP 137-139) ; elle introduit elle-même une conséquence de cette idée à travers le trait pertinent suivant : « certaines molécules qui sont sorties de l'eau (...) vont retomber à la surface et refaire des liaisons » (TdP 139) ; en prenant l'exemple d'une bouteille fermée dont l'eau ne s'évapore pas, elle amène l'idée d'un équilibre entre les molécules qui sortent du liquide et les molécules qui rentrent dans le liquide (TdP 141) ; en prenant l'exemple d'une bouteille ouverte dont l'eau parvient à s'évaporer, elle argumente que dans ce cas, « [les molécules] ont la possibilité de s'éloigner de la surface et de pas y retourner » (TdP 143) ; elle délègue localement à Charlène la responsabilité de la suite ; celle-ci désigne le trait pertinent relatif au rôle du vent dans l'évaporation : un courant d'air permet aux molécules sorties « de ne pas retomber dedans [dans le liquide] » (TdP 144) ; Esther valide aussitôt cette interprétation (TdP 145).

Interprétation de l'Extrait E6

Le mécanisme microscopique du facteur « vent » que Charlène développe dans cet extrait (les molécules du vent qui arrachent celles du liquide dans leur mouvement ordonné) apparaissait déjà dans le travail de groupe de l'Extrait E4 : cette proposition trouve une place dans la discussion collective et force l'enseignante à trouver des moyens de régulation afin de la rendre compatible avec les enjeux de savoir visés.

Développons la nature des techniques qu'Esther utilise dans ce but :

- Elle se fonde sur des éléments de la référence déjà-partagée, qu'elle peut se contenter de faire rappeler aux élèves, par appel à la mémoire didactique : ainsi, est réintroduit dans le milieu l'idée que l'agitation moléculaire des gaz est désordonnée à cause des collisions permanentes des molécules entre elles.
- Elle introduit des conséquences logiques de ces éléments : puisque les molécules d'un gaz s'agitent dans tous les sens, les molécules du liquide qui s'est évaporé sont susceptibles de retourner au sein du liquide, et de recréer des liaisons.
- Elle s'appuie sur certaines caractéristiques de la proposition de Charlène : le fait que les molécules du vent possèdent un mouvement ordonné (et non pas « au bol », selon les mots de Charlène) est capital pour comprendre pourquoi l'air en mouvement est un facteur d'accélération de l'évaporation alors que l'air statique est un facteur de décélération de l'évaporation. Charlène est d'ailleurs en mesure d'amener elle-même la dernière pierre au

raisonnement : les molécules du vent, de par leur mouvement d'ensemble, empêchent les molécules de liquide évaporé d'y retomber, en les éloignant de sa surface.

Au final, la discontinuité qui existe entre ce qu'institutionnalise Esther et les manières antérieures des élèves (dont Charlène) d'interpréter microscopiquement le rôle du vent est atténuée par le fait qu'elle s'appuie sur certains éléments précédemment institutionnalisés et sur des objets amenés par les élèves (le caractère ordonné du mouvement des molécules du vent proposé par Charlène).

Extrait E7 : Traitement du facteur « la pression »

- 179.**Ens : bien/ceux qui ont terminé/qui sera le premier à me trouver /le dernier facteur qui peut influencer la vitesse↑
- 180.**Esp : La pression
- 181.**Ens : ouais/bien Esp/alors la pression/d'accord/mettons ça/hein/ parce qu'à mon avis y en a certains qui/ (note pression)/la pression
- 182.**Oli : mais la pression de sous la terre ↑
- 183.**Ens : non/la pression alors/jusqu'à on a/ Oli↑/ on a jamais parlé rien que de la pression atmosphérique/de la pression des gaz/d'accord↑/donc on va rester sur une pression /la pression atmosphérique donc la pression de l'air ambiant/et c'est vrai que c'est ça je pense peut-être certains d'entre vous n'ont pas eu l'occasion de le constater donc je vais vous le donner/si vous avez heu/ un nouveau/prenez notre serviette de bain/elle va sécher plus vite si vous êtes en altitude que si vous êtes au bord de la mer/Pour autant que les conditions d'ensoleillement de température et de vent soient exactement les mêmes/mais si la seule chose qu'on change c'est l'altitude/he ben la serviette va sécher plus rapidement quand vous êtes à la montagne/et pourquoi ça↑/pourquoi ça/pourquoi ça/hmm vas-y Charlène
- 184.**Cha : ben quand il y a plus de pression eh ben il y a plus de molécules qui appuient/sur la surface/et du coup quand il y en a moins eh ben ça les/ ça les écrase moins/elles peuvent plus facilement partir
- 185.**Ens : alors à part le terme écraser/ c'est exactement ça/(rires)/ donc la pression comment on l'avait définie heu↑/ Oli↑/on avait dessiné/ défini comment une pression atmosphérique/une pression de d'un gaz↑
- 186.**Oli : On avait dessiné euh/ avec à l'intérieur /euh par exemple à l'intérieur du tube/à l'extérieur du (xxx)/ on avait dessiné ça comme ça
- 187.**Ens : Oui/mais que /comment tu définirais simplement avec l'aide de notre modèle moléculaire↑/ça correspond à quoi↑
- 188.**Oli : ben/// y a la flaque eeet
- 189.**Ens : Plus simple/qu'est-ce que c'est que la pression de gaz↑/ Genre en ce moment j'ai la pression sur ma main (fait un geste)/qu'est-ce qui se passe au niveau microscopique↑
- 190.**Oli : aaaah/ ben c'est les molécules de gaz qui tapent contre/contre la main
- 191.**Ens : Exactement/vous avez donc les molécules agitées qui viennent régulièrement taper/et former au final une poussée qu'on a appelée pression/(à Cha)et ce que tu as très bien dit c'est qu'effectivement il y a une sorte de quelque chose qui pousse/qui appuie/c'est cette pression/et ça va limiter le nombre de molécules qui arrivent à sortir/Parce qu'il faut voir que cette pression elle va s'exercer aussi sur la surface de votre liquide/et elle va limiter le nombre de molécules qui arrivent à facilement sortir de ce liquide/donc si vous descendez la pression autour de de votre liquide/et ben l'évaporation elle va se faire beaucoup plus vite/ d'ailleurs on avait pu le constater quand on avait mis sous la cloche à vide l'eau juste après l'ébullition vous vous souvenez↑

Extrait E7 : Traitement du facteur « la pression » - S2 [(0:27:00) - (0:29:30)]

Analyse [méso/topo/chronogène]

À la demande d'Esther (TdP 179), Espéran introduit « la pression » (TdP 180), que l'enseignante reconnaît aussitôt comme un facteur valide d'accélération de l'évaporation (TdP 181). Olivia soumet alors l'objet « la pression sous la Terre » (TdP 182) à l'approbation de l'enseignante. Esther invalide ce rapport à l'objet « pression » et à la place, désigne comme pertinent les objets « la pression atmosphérique », « la pression des gaz », « la pression de l'air

ambient » (TdP 183). Puis, elle injecte un nouvel objet illustrant le rôle de la pression : tous les autres facteurs étant identiques par ailleurs, « la serviette de bain sèche plus vite en altitude qu’au bord de la mer » (TdP 183). Charlène développe l’idée que « plus de pression » équivaut à « plus de molécules qui appuient sur la surface [du liquide] » et « moins de pression » signifie des molécules moins écrasées « qui peuvent plus facilement partir » (TdP 184). À partir de ce moment, Esther se place dans une posture d’accompagnement et organise un ralentissement chronogénétique de l’action. Elle pointe comme non-pertinent l’objet « écraser » pour décrire le comportement des molécules de l’air par rapport à la surface du liquide, puis elle fait appel à la mémoire didactique des élèves pour qu’ils restituent la définition de la pression atmosphérique (TdP 185). Après deux tentatives avortées qui reprennent notamment les conditions d’introduction de la pression dans la classe (comparaison de la pression « à l’intérieur et l’extérieur d’un tube », TdP 186), Olivia amène l’objet : la pression, « c’est des molécules qui tapent contre la main » (TdP 190). L’enseignante valide et complète en passant au niveau macroscopique : « les molécules agitées qui viennent régulièrement taper forment une poussée qu’on a appelé pression » (TdP 191). Elle est alors en mesure de revenir à la situation d’évaporation en reformulant la proposition de Charlène : la pression de l’air « s’exerce aussi sur la surface du liquide » et « limite le nombre de molécules qui arrivent à en sortir » et donc, plus la pression baisse, plus l’évaporation va être accélérée (TdP 191). Elle fait une dernière fois fait appel à la mémoire didactique en rappelant que la classe a déjà constaté que la vaporisation était accélérée sous une cloche à vide (TdP 191).

Interprétation de l’Extrait E7

Le mécanisme microscopique que Charlène développe dans cet extrait se pose en réponse à l’objet « la pression » amené par Esperan. Il apparaissait déjà dans le travail de groupe de l’Extrait E4 dans un autre contexte : sa résurgence dans la discussion collective montre que Charlène a été capable d’établir une connexion entre le sujet de la discussion collective (l’exploration du rôle de la pression dans l’évaporation) et les conditions premières de l’apparition de cette idée au sein du duo (la remémoration de l’expérience d’évaporation sous la cloche à vide, cf. Extrait E4). Cette proposition trouve donc une place dans la discussion collective. Il s’avère qu’il s’agit d’un trait pertinent de l’interprétation microscopique de la pression, comme facteur d’accélération de l’évaporation, compatible avec les savoirs visés par Esther. Celle-ci se place alors dans une posture d’accompagnement et organise un ralentissement chronogénétique de l’action dès l’apparition de la proposition de Charlène dans le milieu en développant les gestes suivants :

- Elle transforme la proposition de Charlène afin qu’elle devienne compatible avec les standards de la référence déjà-partagée : elle en exclut le terme « écraser » en référence aux molécules de l’air, qui porte les germes d’une confusion entre le niveau microscopique et le niveau macroscopique.
- Elle organise la diffusion de la proposition de Charlène en deux temps : d’abord, elle la met de côté provisoirement et fait restituer aux autres élèves la définition de la pression, par appel à la mémoire didactique ; elle revient ensuite à l’expérience d’évaporation et, en

établissant la connexion entre la pression au niveau microscopique (« les molécules de l'air qui tapent sur la surface du liquide », objet amené par Charlène) et la pression au niveau macroscopique (« la poussée »), elle montre que les molécules de l'air statique empêchent l'évaporation.

- Elle corrobore la proposition de Charlène, par appel à la mémoire didactique, en évoquant une expérience déjà effectuée : l'eau, sous une cloche à vide, continuait de bouillir même si elle n'était plus à 100°C.

Comme précédemment, l'espace de négociation de l'enseignante est tel qu'elle peut opérer de façon continue entre les objets apportés par Charlène et Esperan et ceux institutionnalisés en fin d'extrait.

9.5 Synthèse de l'analyse des différents extraits : dynamique de construction des savoirs et schémas d'action

La dynamique de construction des savoirs dans la classe d'Esther est résumée dans les tableaux ci-dessous. Cette dynamique est assez homogène tout au long de l'activité pour que nous nous contentions de résumer très brièvement la succession des objets principaux du milieu (O1, O2, O3, etc.). Nous nous concentrons ensuite sur la mise en lumière de généralités et de régularités qui contribuent à établir des schémas d'action de l'enseignante et des élèves.

Dans la première tâche, les élèves sont censés expliquer le mécanisme de l'évaporation au niveau moléculaire, en s'aidant de la différence de comportement entre la goutte d'eau et la goutte d'alcool.

Discussion des hypothèses et adoption d'un modèle moléculaire de l'évaporation

- 1) Proposition Collisions : les molécules présentes dans l'air viennent percuter les molécules d'alcool, ce qui leur donne l'impulsion nécessaire pour briser leurs liaisons et les arracher du reste du liquide (Groupe Selma & Caroline, groupe Alysson & William)
- 2) Sous la cloche à vide, l'évaporation est accélérée → **contradiction avec la proposition « Collisions »** → **invalidation de la proposition « Collisions »**
- 3) **Modèle moléculaire de l'évaporation** : les molécules à la surface du liquide ont moins de liaisons intermoléculaires que les autres; l'agitation de certaines peut être suffisante pour leur permettre de briser leurs liaisons et de s'échapper du liquide

La proposition « Collisions » (O1), défendue par les groupes Selma & Caroline et Alysson & William, impute l'évaporation à une rupture des molécules du liquide causée par les molécules de l'air alentour. Esther organise la contradiction entre cette proposition et une expérience imaginée, qui fait intervenir la cloche à vide (O2) : puisque l'évaporation est accélérée sous une cloche à vide, les molécules de l'air ne peuvent pas avoir le rôle que leur fait tenir la proposition

« Collisions ». Celle-ci est invalidée. Esther reprend néanmoins le trait pertinent qu'elle contenait (les liaisons intermoléculaires du liquide doivent se rompre) et l'intègre à sa propre explication : le modèle moléculaire de l'évaporation (O3), qui repose sur le fait que les molécules de la surface possèdent moins de liaisons que les molécules au sein du liquide.

Dans la deuxième tâche, les élèves sont censés trouver les facteurs d'accélération de l'évaporation en s'aidant de la convocation des conditions optimales pour sécher le linge à la maison, d'une part, et développer les raisons microscopiques pour lesquelles ces facteurs accélèrent effectivement l'évaporation, d'autre part.

Groupe Diane & Charlène

- 4) La chaleur pousse les molécules à s'agiter davantage et donc à briser leurs liaisons plus facilement : l'eau liquide se vaporise alors plus rapidement.
- 5) Le vent accélère l'évaporation car les molécules du vent raclent sur la surface du liquide et arrachent ses molécules.
- 6) Les molécules au-dessus du liquide appuient sur sa surface et empêchent que les molécules du liquide s'échappent. Sans molécule au-dessus, les molécules du liquide partent plus rapidement, ce qui veut dire que le liquide s'évapore plus vite

Discussion collective

- 7) Facteur « surface en contact avec l'air » : les molécules d'un linge en boule mettent plus de temps pour parvenir à la surface les unes après les autres (Diane) → Plus il y a de molécules en surface, plus l'évaporation va se faire vite, car le nombre de molécules qui ont des liaisons faibles est plus élevée.
- 8) Facteur « vent » : les molécules du vent, qui possèdent un mouvement ordonné, raclent la surface du liquide et en arrachent les molécules (Charlène) → Le mouvement ordonné des molécules dans l'air va emporter loin de la surface les molécules qui s'en sont détachées et empêcher celles-ci de retomber dans le liquide.
- 9) Facteur « pression » : les molécules de l'air écrasent les molécules du liquide et les empêchent de sortir (Charlène) → En diminuant la pression sur la surface du liquide, on permet aux molécules de s'en échapper plus facilement.

Lors de la discussion collective, Diane évoque les molécules d'un linge en boule qui mettent du temps pour parvenir à la surface les unes après les autres (O7). Esther se saisit de l'idée de Diane, en exclut le trait non-pertinent (les molécules qui **parviennent** à la surface) et la généralise en faisant raisonner les élèves sur un récipient étroit et un récipient large : plus il y a de molécules en surface qui possèdent peu de liaisons intermoléculaires, plus l'évaporation se fait vite (O7).

Puis, Charlène reprend une idée déjà développée dans le travail en duo : les molécules du vent, qui possèdent un mouvement ordonné, raclent la surface du liquide et arrachent ses molécules (O5, O8). Esther reprend le trait pertinent de cette proposition (le caractère ordonné du mouvement des molécules du vent) et sollicite la mémoire didactique pour rappeler que les molécules du liquide qui s'est évaporé sont tout à fait susceptibles d'y retomber, de par leur mouvement aléatoire : c'est parce que le vent les emporte loin de la surface qu'il constitue bien un facteur d'accélération de l'évaporation (O8).

Enfin, Charlène reprend de nouveau une idée déjà développée dans le travail en duo : les molécules de l'air écrasent les molécules du liquide et les empêchent de sortir (O6, O9). Esther se saisit de l'idée de Charlène, en exclut le trait non-pertinent (les molécules qui « **écrasent** » la surface), l'illustre avec l'exemple du linge qui sèche plus vite en altitude, et la développe en faisant appel à la mémoire didactique pour rappeler les définitions macroscopique et microscopique de la pression : leur utilisation combinée permet d'expliquer la raison pour laquelle, en diminuant la pression sur la surface d'un liquide, on permet aux molécules de s'en échapper plus facilement (O9).

Nous avons déjà souligné à plusieurs reprises le cheminement continu qui existe entre les rapports aux objets construits par les élèves à l'issue des travaux de groupe et les rapports aux objets qui finissent par être institutionnalisés à la fin des tâches. Autrement dit, l'enseignante est en mesure de travailler les rapports aux objets des élèves sans provoquer de discontinuité majeure entre ce qu'ils produisent et ce qu'elle souhaite promouvoir dans le milieu. Dans la suite de la synthèse, nous souhaitons éclairer la rationalité de cette continuité, notamment en dégagant les connexions avec l'existence de la référence déjà-partagée.

La référence déjà-partagée vient contraindre les possibles des rapports aux objets que développent les élèves face à une tâche. Ceux-ci utilisent la référence de premier niveau (les différentes versions du modèle moléculaire) et de second niveau (les exemples d'application du modèle moléculaire à plusieurs phénomènes) pour créer de nouveaux rapports aux objets ; par exemple, Caroline et Selma s'emparent de l'idée du mouvement des molécules de l'air (idée précédemment institutionnalisée) pour mettre au point la proposition « Collisions » ; Charlène et Diane invoquent la définition microscopique de la chaleur pour illustrer le rôle qu'elle joue dans l'accélération de l'évaporation, etc. En délimitant les interprétations possibles des éléments du milieu par les élèves, la référence déjà-partagée constitue un cadre à l'intérieur duquel leurs idées peuvent se développer. Nous n'avons pas eu l'occasion de le développer dans l'analyse mais les rares occurrences qui ne suivent pas ce schéma d'action subissent des conséquences drastiques : dans la première tâche de construction d'un modèle moléculaire pour l'évaporation, lorsqu'un élève propose « la gravité », cet objet est aussitôt exclu du milieu par Esther. La régulation ferme de l'enseignante est une façon de circonscrire les propositions qui peuvent survivre dans le collectif. Mais en général, les normes installées dans le milieu suffisent à cette fin : les élèves, habitués à cet exercice à ce stade de la séquence, produisent des rapports aux objets qui se ressemblent (la proposition « Collisions » est amenée par deux groupes qui ne se sont pas concertés) et qui montrent leur tentative de prise en main du modèle moléculaire. Il s'avère que les rapports aux objets que construisent les élèves vont dans la direction des savoirs

visés par l'enseignante, dans le sens où ils partagent des traits pertinents avec eux : la proposition « Collisions » valorise la rupture entre les molécules du liquide, caractéristique qui sera reprise par Esther pour installer un modèle moléculaire de l'évaporation ; le mouvement ordonné des molécules du vent est amené par Charlène puis réutilisé par l'enseignante pour défendre l'idée que le vent empêche les molécules du liquide d'y retomber, etc. Le pas à franchir est moindre lorsque les élèves apportent eux-mêmes des éléments pertinents : c'est la première raison pour laquelle la référence déjà-partagée aide à mettre en place une continuité.

La référence déjà-partagée permet également de donner à l'enseignante des arguments de négociation des rapports aux objets imaginés par les élèves, et ainsi de corroborer ou contredire leurs idées. Pour contredire la proposition « Collisions », Esther et ses élèves se réfèrent à une expérience imaginée faisant intervenir la cloche à vide, objet issu de la référence et dont les ramifications théoriques et techniques ont déjà été explorées. Pour établir une connexion entre « la pression », objet amené par Esperan et « les molécules de l'air appuient sur la surface du liquide », objet amené par Charlène, Esther fait appel à des éléments de la référence déjà-partagée : c'est la mise en lien de la définition microscopique et macroscopique de la pression qui permet d'argumenter que les deux objets (celui amené par Esperan et celui amené par Charlène) se renforcent l'un l'autre, et de les corroborer. La référence déjà-partagée permet donc à Esther de tenir compte de ce que produisent les élèves : les propositions des élèves ne sont pas simplement diffusées puis ignorées et oubliées ; au contraire, elles sont traitées et travaillées en profondeur afin de les rendre compatibles avec les savoirs visés, ce qui contribue à la continuité des objets qui se succèdent dans la classe.

Cependant, les rapports aux objets que développent les élèves lorsqu'ils se confrontent à une tâche donnée sont rarement suffisants à eux-seuls pour faire avancer le savoir, même en extrayant leurs traits pertinents : l'enseignante est contrainte d'injecter elle-même de nouveaux objets dans le milieu. Nous expliquons rapidement pourquoi cette injection d'objets n'est pas forcément synonyme de discontinuité :

- D'une part, les objets qu'Esther introduit ne sont pas drastiquement nouveaux du point de vue des élèves : ils constituent un prolongement, un enrichissement des éléments de la référence déjà-partagée. Lorsqu'Esther présente le modèle moléculaire de l'évaporation, elle n'ajoute en réalité qu'une seule information à un modèle moléculaire de l'état liquide déjà constitué : le fait que les molécules de la surface d'un liquide possèdent moins de liaisons intermoléculaires que les molécules au sein du liquide. Tout le reste du modèle microscopique de l'état liquide reste valide et continue à faire référence : dans ces conditions, il est raisonnable d'affirmer qu'il s'agit d'une micro-discontinuité et non d'une rupture franche avec l'état antérieur du milieu.
- D'autre part, aussitôt la micro-discontinuité introduite, elle organise un ralentissement du temps didactique, en permettant aux élèves de s'appropriier et de se familiariser avec les objets récemment apportés. Ainsi, après l'introduction du modèle moléculaire de l'évaporation, qui provoque une micro-discontinuité avec les façons des élèves de se représenter l'évaporation, elle propose d'appliquer ce modèle à des situations familières

(non-problématiques) du séchage du linge. Cette tâche permet aux élèves de mettre à l'épreuve et de négocier leur compréhension du modèle moléculaire enrichi, qui comprend à présent la nouvelle information sur les molécules de surface. C'est donc le choix raisonné de l'articulation des tâches à donner aux élèves qui permet de combler les micro-discontinuités potentielles.

L'ensemble de ces caractéristiques contribue au parcours continu qui se crée entre les rapports aux objets construits par les élèves et les rapports aux objets institutionnalisés à la fin de la tâche. Pour organiser cette continuité, l'enseignante déploie une palette diversifiée de techniques topogénétiques, mésogénétiques et chronogénétiques : au niveau topogénétique, elle est capable de se placer en retrait ; se mettre en position d'accompagnement ; se placer en surplomb, etc. Au niveau mésogénétique, elle est en mesure de désigner les traits pertinents ou non-pertinents ; d'organiser la contradiction ou de fournir des éléments de corroboration, etc. Au niveau chronogénétique, elle peut accélérer ou ralentir le temps didactique (notamment, en faisant appel à la mémoire didactique). Nous avons déjà soutenu l'idée que c'est l'existence de la référence déjà-partagée qui autorise cette flexibilité des techniques de l'enseignante, nous complétons en affirmant qu'elle ne l'entraîne pas nécessairement et que l'ingéniosité de l'enseignante est cruciale pour saisir les occasions adéquates et amener un équilibre entre tous les gestes qui peuvent potentiellement être déployés dans une situation donnée.

Quant aux élèves, ils sont capables d'établir des connexions entre les modèles théoriques et les faits empiriques, et ce, de plusieurs manières: ils sont en mesure de proposer des hypothèses recevables afin d'enrichir un modèle moléculaire (c'est l'enjeu de la première tâche) ; mais aussi d'appliquer ou de réutiliser un modèle déjà à disposition pour expliquer des faits que l'enseignante leur désigne (c'est l'enjeu de la deuxième tâche). Au final, la continuité qui caractérise la succession des objets qui entrent dans le milieu démontre que les élèves participent à la dynamique de construction des savoirs dans la classe, d'une façon symétrique (mais non équivalente) à la construction des savoirs par les communautés scientifiques.

Une dernière remarque s'impose : nous avons remarqué dans l'analyse des obstacles épistémologiques (cf. 6.2) à quel point les modèles moléculaires rompaient avec les manières usuelles de penser la matière et ses transformations. Or, la première version du modèle moléculaire a été introduite dans la classe d'Esther quelques mois avant le début des enregistrements et a probablement entraîné une discontinuité importante avec les rapports à certains objets (« matière », « liquide », « solide », « gaz », etc.) que les élèves entretenaient jusque-là. Il est alors légitime de s'interroger : la continuité mise en lumière précédemment caractérise-t-elle vraiment la totalité de la séquence observée ? Ou bien le moment de l'enregistrement des données donne-t-il une vision biaisée de la dynamique de construction de savoirs de cette séquence ? Ces questions, fondamentales au regard de nos questions de recherche, seront reprises dans la discussion.

Quel degré de continuité entre les rapports aux objets construits par les élèves et ceux visés par l'enseignante ?

Les élèves d'Esther ont l'occasion de développer des propositions qui expliquent l'évaporation au niveau moléculaire dans la première tâche et d'appliquer le modèle moléculaire de l'évaporation qui vient d'être institutionnalisé aux conditions optimales de séchage du linge dans la seconde tâche.

Dans les deux tâches, les propositions des élèves sont prises en compte, négociées et contribuent à l'avancée des savoirs :

- les caractéristiques pertinentes de leurs propositions sont reprises et renforcées à l'aide d'éléments issus de la référence déjà-partagée (par exemple, la pression comme facteur de décélération de l'évaporation, proposée par Esperan lors de la seconde tâche est soutenue par la définition microscopique de la pression qui fait partie de la référence déjà-partagée)
- les caractéristiques non-pertinentes sont exclues sur la base de contradictions effectuées à l'aide d'autres éléments de cette même référence (par exemple, l'expérience imaginée d'une accélération de l'évaporation sous la cloche à vide contredit la proposition « Collisions » imaginée par deux groupes lors de la première tâche)

D'autre part, après l'introduction du modèle institutionnalisé de l'évaporation qui fait intervenir des savoirs nouveaux que les élèves n'avaient pas été en mesure d'anticiper (notamment, le fait que les molécules de la surface du liquide créent des liaisons intermoléculaires plus faibles que les molécules au sein du liquide), les élèves se confrontent à une tâche d'application de ce modèle, ce qui leur permet d'éprouver sa fonctionnalité et sa raison d'être. En reliant les facteurs d'accélération de l'évaporation au modèle moléculaire de l'évaporation, la seconde tâche permet de combler la micro-discontinuité générée par son introduction.

Ces conclusions nous ont permis d'établir qu'il existe un cheminement continu entre les rapports aux objets construits par les élèves à l'issue des travaux de groupe et les rapports aux objets qui finissent par être institutionnalisés à la fin des tâches observées.

Quels schémas d'action l'enseignante développe-t-elle au cours de la négociation des rapports aux objets construits par les élèves pour atteindre ce degré de continuité ?

E1) Esther met en œuvre une progression « cyclique » des tâches proposées aux élèves. En amont de la séquence observée, au début de l'année scolaire, elle a amené un modèle moléculaire de la matière dans lequel la matière est représentée par un ensemble de molécules, qui ne se déforme pas, qui possède chacune une masse et qui sont plus ou moins fortement liées entre elles. À partir de ce modèle de départ, plusieurs situations expérimentales ont été portées à la connaissance des élèves et ont abouti à divers constats empiriques : compressibilité du gaz et incompressibilité du liquide, diffusion de matière dans un gaz ou un liquide, diffusion de chaleur dans un solide, dissolution d'un solide au sein d'un liquide, équilibre ou déséquilibre des pressions des gaz de part et d'autre d'une surface mobile, changements d'état, etc. Chacune de ces situations a fourni une occasion d'appliquer ou d'affiner le modèle moléculaire de départ, qui s'est, au moment des observations, enrichi de composantes telles que l'association entre la température d'un gaz et la vitesse moyenne des molécules qui le composent.

Esther organise donc une complexification progressive des tâches s'organisant autour d'un unique enjeu qui se densifie au fil du temps : l'acquisition et la maîtrise d'un modèle moléculaire de la matière.

E2) Esther propose aux élèves d'évoluer au sein de milieux structurés avec en arrière-plan une référence déjà-partagée dense. En effet, les milieux des tâches sont délimités par la mise en place d'expériences épurées (par exemple, l'observation de l'évaporation d'une goutte d'eau et d'une goutte d'alcool), ou d'évocation de phénomènes précis (les conditions optimales de séchage du linge), le tout étant accompagné de consignes contraignantes (expliquer ces phénomènes au niveau moléculaire). Quant à la référence déjà-partagée, elle se compose d'une référence de premier niveau (le modèle moléculaire en vigueur au moment des observations qui a déjà été enrichi par rapport à celui de départ) et une référence de second niveau (une palette étendue d'exemples d'application de ce modèle aux divers phénomènes cités ci-dessus).

E3) Esther déploie une palette diversifiée de techniques chronogénétiques, topogénétiques et mésogénétiques qui lui permettent de négocier les apports des élèves dans le milieu. Par exemple, elle contredit la proposition « Collisions », en se référant à une expérience imaginée faisant intervenir la cloche à vide ; elle renforce le caractère pertinent du déplacement ordonné des molécules de l'air pour expliquer le rôle du vent dans l'évaporation en faisant appel à la référence de premier niveau ; etc. D'autre part, elle organise un ralentissement chronogénétique lorsque les objets récemment apportés sont radicalement nouveaux du point de vue des élèves : ainsi, dès l'introduction du modèle complet de l'évaporation, elle leur propose une tâche d'application de ce modèle à une situation familière (le séchage du linge).

La conjonction de ces schémas d'action permet d'éclairer les conclusions formulées à propos des degrés de continuité :

- Les normes et habitudes spécifiques installées dans la classe (à travers la référence déjà-partagée de premier et de second niveau) ainsi que la structuration étroite du milieu (E1 et E2), permettent aux élèves de construire des rapports aux objets proches les uns des autres, d'une part et qui possèdent des caractéristiques communes avec les rapports aux objets visés par l'enseignante, d'autre part.
- La densité de la référence déjà-partagée fournit un panel d'arguments possibles à l'enseignante qui lui permet de négocier les rapports aux objets construits par les élèves (E3) à travers des gestes de contradiction et/ou de renforcement.

Ces deux points expliquent la continuité qui existe entre les rapports aux objets construits par les élèves et ceux qui sont institutionnalisés par l'enseignante.

Chapitre 10 ANALYSE EMPIRIQUE D'UNE CLASSE AU SECONDAIRE INFÉRIEUR EN FRANCE : NATHAN

10.1 Présentation du contexte de la classe de Nathan

Nous présentons le contexte de la classe de Nathan, en donnant quelques repères par rapport à l'école et la classe ainsi que l'enseignant.

10.1.1 Le collège et la classe

Le collège se situe dans la banlieue éloignée d'une grande ville de province (Toulouse) et comprend plusieurs classes par niveau.

La classe observée correspond au niveau 5^{ième} (c'est-à-dire des élèves âgés de 12 à 13 ans, qui sont dans la deuxième année du secondaire inférieur). C'est la première année scolaire où les élèves étudient les sciences physiques, en tant que discipline autonome, avec un enseignant spécialiste. Le nombre d'élèves par classe est réduit pour cette discipline et ce niveau : les classes comprennent 18 élèves, résultat du mélange de deux classes distinctes.

Selon l'enseignant, l'univers social d'origine des élèves est homogène et relève d'un milieu plutôt aisé. Il estime les élèves « très volontaires » et d'un « bon niveau », à l'exception d'un ou deux élèves par classe qui présentent de réelles difficultés scolaires. Il constate cependant une tendance générale des élèves à présenter quelques « lacunes à l'écrit ». Hormis ce fait, les classes de Cinquième ne lui posent aucun problème particulier. La moyenne des évaluations de ses classes de Cinquième se situe entre 15/20 et 20/20, nous dit-il (entretien ante observation, min 18).

10.1.2 L'enseignant

Depuis une maîtrise en sciences physiques et le Certificat d'Aptitude au Professorat de l'Enseignement du Second degré (CAPES) en sciences physiques obtenu il y a une quinzaine d'années, Nathan enseigne cette discipline. Après un passage en banlieue parisienne, il enseigne depuis plusieurs années dans ce même collège. Il considère suivre le programme de physique chimie 2008 dont il garde toujours un exemplaire dans son classeur, tout en admettant qu'il « déborde » parfois de son cadre.

Il fait partie du « groupe formateurs » de l'académie considérée, dont une des missions est la création et la diffusion de nouvelles ressources en physique-chimie.

10.2 Présentation générale des séances observées

La partie observée dans les classes de Nathan correspond à quatre séances d'une heure et demie.

Elle s'insère dans une séquence qui vise à permettre l'étude des états et des changements d'états de la matière (cf. Tableau 15, p. 267). Des productions écrites relatives à cette séquence (le document de planification de Nathan, les documents distribués aux élèves, des grilles de compétence dont Nathan se sert) se trouvent dans l'annexe D.

Au sein de cet enjeu N+2, on peut distinguer trois enjeux de niveau inférieur N+1 : le premier concerne l'étude des caractéristiques des états de la matière ; le second a trait à l'étude des méthodes d'analyse des propriétés de la matière ; le troisième est relatif aux propriétés des changements d'état des corps purs. Les deux premiers sous-enjeux cités se subdivisent encore en enjeux de niveau inférieur (N1, N2, N3, N4, N5), que nous ne développons pas puisque nous ne les abordons plus dans le reste du texte. Quant au troisième, il se scinde en deux enjeux de niveau inférieur : d'abord, l'étude des propriétés de l'ébullition des corps purs (N6) ; puis l'étude des propriétés de solidification des corps purs (N7).

Ces différents découpages sont résumés dans le synopsis ci-dessous (cf Tableau 15, p. 267) :

Enjeux de niveau N+2	Enjeux de niveau N+1	Enjeux de niveau N
Etude des propriétés des états et changements d'état de la matière	Etude des caractéristiques des trois états de la matière	...
		Etude d'une propriété spécifique de l'état liquide <i>S1[45 min]</i> N1
		Etude des propriétés spécifiques de l'état gazeux <i>S1[45 min]</i> N2
	Etude des méthodes d'analyse des propriétés de la matière	Etude de la méthode de mesure d'une quantité physique sur un appareil gradué <i>S2[45 min]</i> N3
		Etude de la méthode de tracé d'un graphique à partir d'un tableau de données expérimentales <i>S2[45 min]</i> N4
		Etude de la méthode de prise de mesure d'une température sur un thermomètre à alcool <i>S3[20 min]</i> N5
	Etude des propriétés des changements d'état des corps purs	Etude des propriétés de l'ébullition des corps purs <i>S3-S4[1h10]</i> N6
Etude des propriétés de la solidification des corps purs <i>S4 - ...[...]</i> N7		

Tableau 15 : Synopsis de la séquence de Nathan

Nous nous intéressons à un enjeu ayant pour thème un changement d'état de l'eau qui fait intervenir l'état gazeux. Dans ce cadre, l'unique enjeu qui apparaît en entier et de façon développée (c'est-à-dire d'une durée de quelques dizaines de minutes) est celui relatif à l'étude des propriétés de l'ébullition des corps purs (N6) (cf. la partie grisée dans le Tableau 15). Nous l'analysons donc en détail ci-dessous.

10.3 Présentation de l'enjeu N6 étudié : Etude des propriétés de l'ébullition des corps purs

10.3.1 Description générale de l'enjeu N6 : Etude des propriétés de l'ébullition des corps purs

L'étude des propriétés de l'ébullition des corps purs (N6) est séparée en plusieurs enjeux de niveau inférieur : d'abord, l'étude des propriétés de l'ébullition de l'eau pure (N61) ; puis l'étude des propriétés de l'ébullition de l'éthanol pur (N62) ; et en guise de synthèse, la généralisation des propriétés de l'ébullition à tous les liquides purs (N63) (cf. Tableau 16, p. 269).

Enjeux de niveau N	Enjeux de niveau N-1	Phases d'action <i>Apports principaux dans la mésogenèse en termes de contenus</i> Résultats d'institutionnalisation en gras
Étude des propriétés de l'ébullition des corps purs N6	Etude des propriétés de l'ébullition de l'eau pure N61	Présentation de l'expérience & consigne <i>Nous allons vaporiser l'eau en la faisant chauffer à l'aide d'un bec électrique.</i> Collectif - S3(20' – 30') N61a
		Réponse aux questions de la fiche d'hypothèses <i>Questions :</i> - <i>Comment évolue la température de l'eau quand on la chauffe ?</i> - <i>Qu'observe-t-on pour l'eau au bout d'un moment ?</i> - <i>Quelle est la température maximale de l'eau ?</i> - <i>Allure du graphe de l'évolution de la température de l'eau</i> Individuel- S3(30' – 43') N61b
		Réalisation de l'expérience d'ébullition de l'eau & tracé du graphe <i>Expérience :</i> - <i>Relever la température de l'eau chauffée au bec électrique toutes les 30 secondes pendant 10 minutes ainsi que la température d'ébullition</i> - <i>Placer ces mesures dans un tableau</i> - <i>Tracer le graphe de l'évolution de la température de l'eau</i> Collectif - S3(43' – 70') N61c
		Validation ou réfutation des réponses aux questions de la fiche d'hypothèses Individuel - S3(70' – 84') N61d
		Bilan de l'expérience d'ébullition de l'eau <i>1) Chauffée par un bec électrique, la température de l'eau monte puis stagne.</i> <i>2) On observe de petites bulles au début puis de grosses bulles lors de la stagnation de la température (autour de 100°C).</i> <i>3) Les petites bulles sont de l'air, les grosses de la vapeur d'eau.</i> <i>4) Interprétation en termes de palier de température : la vaporisation de l'eau démarre à partir du moment où la température stagne ; il existe une coïncidence temporelle entre la stabilisation de la température de l'eau et sa transformation en vapeur d'eau lors de l'ébullition.</i> Collectif - S4(23' – 72') N61e
Etude des propriétés de l'ébullition de l'éthanol pure N62	Discussion du graphe de l'évolution de la température de l'éthanol lors de son ébullition La vaporisation de l'éthanol se fait avec un palier de température autour de 80°C. Collectif - S4(72' – 77') N62a	
Généralisation des propriétés de l'ébullition à tous les liquides purs N63	Discussion des points communs entre l'ébullition de l'eau pure et l'ébullition de l'éthanol pur La vaporisation d'un liquide se fait toujours avec un palier de température. La température du palier dépend de la nature du liquide considéré. Collectif - S4(77' – 82') N63a	

Tableau 16 : Synopsis de l'enjeu N6 « Etude des propriétés de l'ébullition des corps purs »

Enjeu N61 : L'étude des propriétés de l'ébullition de l'eau pure

Le traitement de cet enjeu se déroule en plusieurs phases d'action :

- Dans la première phase (N61a), l'enseignant annonce le plan de la séance et présente l'expérience d'ébullition de l'eau pure et les consignes à gros traits.
- Dans la deuxième phase (N61b), les élèves doivent individuellement anticiper « ce qu'il se passe lorsqu'on chauffe de l'eau pure avec un bec électrique » en répondant à quatre questions d'une fiche nommée « fiche d'hypothèses ».
- Dans la troisième phase (N61c), les élèves réalisent en groupe l'expérience d'ébullition de l'eau pure en suivant les consignes de la fiche « Étude expérimentale de l'évolution de la température au cours de la vaporisation de l'eau » et tracent chacun le graphique correspondant.
- Dans la quatrième phase (N61d), les élèves reviennent individuellement sur la fiche d'hypothèses et valident ou invalident leurs suppositions initiales.
- Dans la cinquième phase (N61e), une discussion collective a lieu et mène à la modélisation de l'ébullition de l'eau pure en termes de palier de température. Celle-ci affirme que la vaporisation de l'eau démarre à partir du moment où la température stagne : il existe donc une coïncidence temporelle entre la stabilisation de la température de l'eau et sa transformation en vapeur d'eau lors de l'ébullition (cf. Figure 38) :

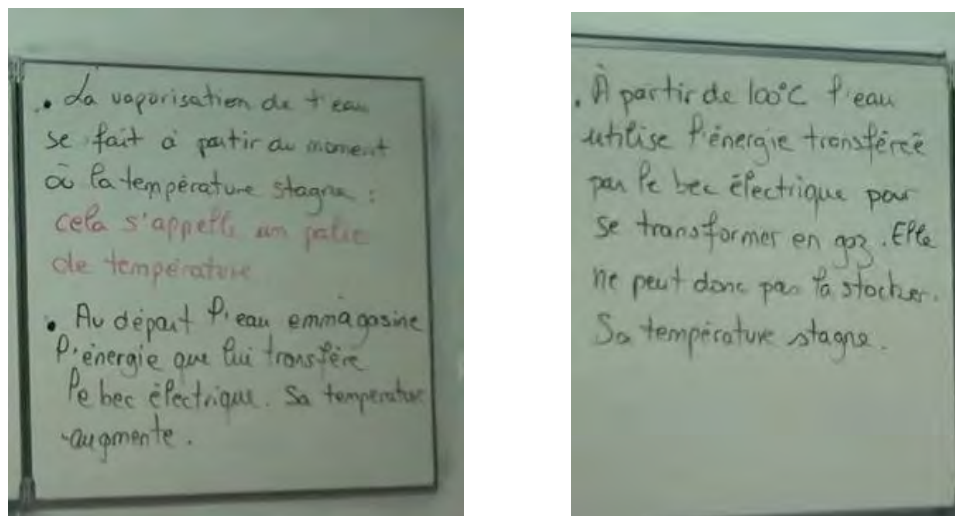


Figure 38 : Institutionnalisation finale des propriétés de l'ébullition de l'eau pure

Au total, l'étude des propriétés de l'ébullition de l'eau pure (N61) couvre la majeure partie de deux séances consécutives d'une heure et demie.

Enjeu N62 : L'étude des propriétés de l'ébullition de l'éthanol pur

Dans l'unique phase relative à cet enjeu (N62a), il s'agit de discuter collectivement des caractéristiques du graphe de l'évolution de la température de l'éthanol lors de son ébullition, graphe déjà tracé et distribué aux élèves. Cette analyse mène à la conclusion de l'existence d'un palier de température dans le cas de l'éthanol pur à une température avoisinant les 80°C.

Enjeu N63 : Généralisation des propriétés de l'ébullition à tous les liquides purs

Dans l'unique phase relative à cet enjeu (N63a), il s'agit de discuter collectivement des points communs entre les propriétés de l'ébullition de l'eau pure et celles de l'ébullition de l'éthanol pur. Cette analyse mène à la conclusion de la généralité de l'existence d'un palier de température à tous les liquides purs lors de leur ébullition et à l'idée que la température du palier dépend de la nature du liquide pur considéré.

Ces phases sont décrites en détail dans le synopsis ci-dessus (cf. Tableau 16, p. 269).

10.3.2 Choix des phases étudiées

Nous effectuons l'analyse microscopique de quatre phases (cf. les parties grisées du Tableau 16, p. 269).

- La première phase (N61c) correspond à la phase de réalisation de l'expérience de l'ébullition de l'eau. Nous étudierons cette phase du point de vue d'un groupe d'élèves : Ana, Mat et Max ;
- Les deuxième et troisième phases (N61b) et (N61d) que nous rassemblons bien qu'elles se déroulent disjointement correspondent aux phases d'émission puis de validation/invalidation des « hypothèses ». La juxtaposition de l'analyse de ces phases donne une occasion idéale pour évaluer l'influence de la réalisation effective de l'expérience d'ébullition sur l'évolution des rapports aux objets du milieu, notamment en ce qui concerne la reconnaissance et l'interprétation du palier de température. Nous étudierons ces phases du point de vue de deux élèves : Paul et Max.
- La quatrième phase (N61e) est la phase de discussion collective menant à l'interprétation de l'expérience d'ébullition de l'eau pure en termes de palier de température et de transferts énergétiques. Cette phase donne à voir comment Nathan tire parti des rapports aux objets construits dans chacun des groupes pendant l'expérience pour amener la modélisation de l'ébullition en termes de palier de température, c'est-à-dire la reconnaissance de la simultanéité entre la stabilisation de la température et la transformation de l'eau liquide en vapeur d'eau.

L'analyse de ces quatre phases consécutives permet de s'interroger sur la nature des objets apportés par les élèves dans le milieu et sur les modes de gestion de ces objets par l'enseignant.

10.3.3 Positionnement par rapport au document institutionnel de référence

On peut établir une connexion entre la nature des institutionnalisations ci-dessus et les parties suivantes du tableau à trois colonnes (Contenus ; Capacités ; Remarques) du programme de Cinquième de physique-chimie 2008 (cf. analyse plus détaillée du programme à la section 3.1) :

Les changements d'état		
Cycle de l'eau.		Thème de convergence : météorologie et climatologie
Solidification, fusion, liquéfaction, vaporisation.	Réaliser, observer, schématiser des expériences de changements d'état.	Thème de convergence : météorologie et climatologie
Lors des changements d'état, la masse se conserve et le volume varie.	Pratiquer une démarche expérimentale pour mettre en évidence ces phénomènes.	
Un palier de température apparaît lors du changement d'état d'un corps pur.	Construire le graphique correspondant en appliquant des consignes. Contrôler, exploiter les résultats.	Thème de convergence : importance du mode de pensée statistique

Figure 39 : Extrait du programme de physique-chimie de 5^{ème} sur les changements d'état

L'enjeu relatif à l'expérience d'ébullition concerne la mise en évidence qu' « un palier de température apparaît lors du changement d'état d'un corps pur ». Les deux « capacités » liées à cet enjeu sont plutôt contrastées : alors que la première (« Construire le graphique correspondant en appliquant des consignes ») structure étroitement le type d'activité que l'enseignant est susceptible de proposer sur ce thème, la seconde (« Contrôler, exploiter les résultats ») est très ample et camoufle toute référence à la première colonne : de quel(s) résultat(s) s'agit-il ? Dans quelle(s) visée(s) les exploiter ? Comment les relier aux contenus de la première colonne ? Autant de questions que l'enseignant doit prendre à sa charge s'il veut satisfaire les exigences de la colonne « Capacités ».

10.4 Analyse microscopique des quatre phases : N61c, N61b & N61d, et N61e

10.4.1 Contextualisation de ces quatre phases au sein de la séquence

Dans la classe étudiée, l'étude de l'ébullition de l'eau pure se situe consécutivement à celle des états de la matière et de leurs propriétés : dans les séances précédentes, plusieurs activités ont été conduites sur ce thème.

Parmi celles-ci, l'activité « L'eau sur la Terre » a permis de montrer sous quel état physique (solide, gazeux, liquide) se répartit l'eau dans les différents réservoirs terrestres (mers, océans, rivières, lacs, eaux souterraines, glaciers). L'activité « Le cycle de l'eau » a abouti à une caractérisation des changements d'état spontanés de l'eau dans la Nature (cf. Figure 40) et a mené à une généralisation vers tous les changements d'état possibles de l'eau (cf. Figure 40).

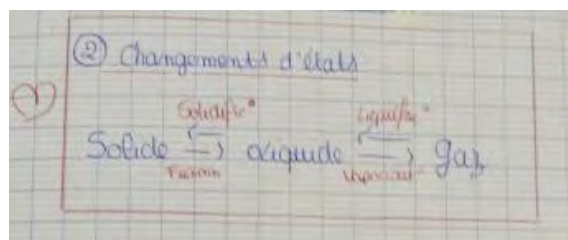


Figure 40 : Le cycle de l'eau et les états de l'eau dans le cahier des élèves

Puis, divers types de tâche (dont les activités intitulées « Surface libre d'un liquide au repos » et « Propriété spécifique des gaz ») ont abouti aux formalisations des caractéristiques des trois états de la matière détaillées ci-dessous telles qu'elles sont notées sur le cahier des élèves :

- Le solide garde toujours la même forme ; on peut l'attraper entre deux doigts.
- Le liquide prend la forme du récipient qui le contient ; on ne peut pas l'attraper entre deux doigts ; il coule ; sa surface libre est horizontale et plane.
- Le gaz est réparti dans tout le récipient ; dans la plupart des cas, il n'est pas visible à l'œil nu ; il est compressible et expansible.

D'autre part, l'enseignant a préparé plus spécifiquement les élèves à l'étude de l'ébullition de l'eau en les faisant travailler sur trois « fiches-méthode ». La première intitulée « Comment lire une graduation ? » expose une technique générale de lecture d'une mesure sur n'importe quel appareil gradué à travers le calcul du plus petit intervalle de graduation.

La seconde fiche-méthode « Comment tracer un graphique à partir de données expérimentales ? » donne la marche à suivre pour tracer un graphique point par point en se basant sur le tableau des abscisses et des ordonnées (cf. Figure 41).

Méthode :

1. Sur une feuille de papier millimétré, tracer deux axes perpendiculaires en n'oubliant pas de les orienter avec des flèches
2. Nommer chaque axe avec la grandeur correspondante et noter l'unité correspondante entre parenthèses
Exemple : si on vous demande de représenter la température T en fonction du temps t
 - axe des abscisses (axe horizontal) : temps t (s)
 - axe des ordonnées (axe vertical) : Température T (°C)
3. En fonction de l'échelle donnée (en 5^{ème}), graduer les axes de manière régulière.
4. Pour chaque mesure, représenter le point correspondant par une croix (+) qui correspond à l'intersection de deux droites, l'une parallèle à l'axe des ordonnées et l'autre parallèle à l'axe des abscisses. La croix représente également le domaine d'incertitude de la mesure.

Figure 41 : Extrait de la fiche-méthode « Comment tracer un graphique à partir de données expérimentales ? »

La troisième fiche-méthode « Comment mesurer la température d'un liquide ? » détaille les précautions à adopter lors de l'immersion du thermomètre dans le liquide afin que la valeur affichée soit la représentation fidèle de la température du liquide considéré (cf. Figure 42).

2 - Précautions à prendre pour effectuer une mesure correcte :

- Déterminer la valeur du plus petit intervalle sur le thermomètre.
- Plonger complètement le réservoir du thermomètre dans le liquide.
- S'assurer que le réservoir ne touche aucune paroi.
- Ne jamais sortir le réservoir pour faire la lecture.
- Placer son œil correctement
- Effectuer la mesure et noter le résultat avec l'unité

Figure 42 : Extrait de la fiche-méthode « Comment mesurer la température d'un liquide ? »

10.4.2 Analyse du milieu primitif mis en place par l'enseignant

10.4.2.1 Analyse a priori du dispositif d'enseignement relatif à la fiche d'hypothèses et la consigne associée

La première fiche, que les élèves sont supposés remplir individuellement en amont de la réalisation de l'expérience d'ébullition, leur demande de formuler des « hypothèses » à propos des phénomènes se produisant lorsqu'on chauffe de l'eau pure avec un bec électrique (cf. Figure 43).

I – Que se passe-t-il quand je fais chauffer de l'eau pure avec un bec électrique ?
(Utilisation d'un bec électrique chauffant jusqu'à 920°C)

HYPOTHESES

a. Comment évolue, selon toi, la température de l'eau au fur et à mesure que l'on chauffe ?

.....

.....

.....

Valide /
Non Valide

b. Qu'observe-t-on pour l'eau au bout d'un moment ? à quelle température cela se produit-il ?

.....

.....

.....

Valide /
Non Valide

c. Quelle est la température maximale que l'eau va pouvoir atteindre ?

.....


.....

.....

Valide /
Non Valide

d. Trace l'allure approximative du graphique de l'évolution de la température en fonction du temps que l'on obtient quand on fait chauffer de l'eau pure sur un bec électrique.

Tu devras représenter ci-dessous le tracé que tu penses obtenir si vous réalises l'expérience de faire chauffer de l'eau sur un bec électrique à 920 °C et que vous relevez la température de manière régulière (aides-toi des réponses aux questions a-b-c)



Valide /
Non Valide

Représente sur le graphique ci-dessus la température maximale atteinte par l'eau ainsi que la température du phénomène que l'on observe dans le récipient au bout d'un moment (voir question 2).

Figure 43 : La fiche d'hypothèses

Cette émission « d'hypothèses » est orientée par quatre questions pour lesquelles nous allons développer une analyse plus longue ci-dessous : on peut d'ores et déjà remarquer que la plupart d'entre elles ne se concentrent que sur la température de l'eau puisqu'il s'agit de prévoir son

évolution au fur et à mesure qu'elle est chauffée, sa valeur maximale atteinte (questions a et b) ainsi que l'allure de son graphe en fonction du temps (question d).

Précisons que ces questions n'appellent pas des réponses sous forme d'hypothèses au sens épistémologique du terme mais plutôt des prévisions (c'est-à-dire des anticipations sur des phénomènes à venir). D'autre part, celles-ci ne sont accompagnées d'aucune demande de justification : l'arrière-plan théorique (scientifique ou naïf) qui les sous-tend n'est pas objectivé. Néanmoins, puisqu'il s'agit du vocabulaire utilisé par Nathan, nous continuerons d'utiliser par commodité le terme « hypothèse » pour désigner les réponses des élèves tout en étant conscients qu'il ne recouvre pas le sens que l'épistémologie réserve à ce terme.

Analyse a priori des questions a. et c. portant sur l'évolution de la température de l'eau

Les questions a. et c. sont formulées de la façon suivante : « a. Comment évolue, selon toi, la température de l'eau, au fur et à mesure que l'on chauffe? » et « c. Quelle est la température maximale que l'eau va pouvoir atteindre ? ». D'autre part, dans son discours d'introduction à la fiche d'hypothèses, l'enseignant précise pour la question a. : « comment évolue selon toi la température de l'eau au fur et à mesure qu'on la chauffe/ donc vous mettez/ elle reste la même/ elle augmente/ elle descend/ elle fluctue (...) / les réponses attendues y en a pas cinquante ». Et il complète la question c. : « quelle est la température maximale de l'eau/ atteinte quand on va chauffer de l'eau avec un bec électrique sachant qu'il va jusqu'à 920°C » (S3, min 35).

Pour répondre à ces questions, il est probable que les élèves fassent appel à des connaissances empiriques antérieures : en particulier, l'idée ordinaire que la température d'un objet continue à augmenter tant qu'il reste en contact avec une source de chaleur (c'est-à-dire un objet dont la température lui est supérieure) peut amener les élèves à proposer que la température de l'eau pure augmente au fur et à mesure qu'elle est chauffée. Dans le même ordre d'idée, l'expérience quotidienne permet de dire que la température d'un objet arrête d'évoluer lorsqu'elle atteint celle de la source de chaleur avec lequel il est en contact (comme un plat préparé dans un four), les élèves feront sans doute l'hypothèse que la température maximale de l'eau est celle du bec électrique. On peut d'ailleurs considérer que la formulation de cette idée est encouragée puisqu'à plusieurs reprises, la température du bec chauffant (920°C) est mentionnée, à la fois sur la fiche et à l'oral par l'enseignant. Il semble d'autant plus difficile pour l'élève de penser à d'autres options que nulle part sur la fiche n'est fait mention du thème dont le chauffage de l'eau va permettre l'étude : les termes « ébullition », « changement d'état », « vaporisation » en sont absents, le titre-même de la fiche « que se passe-t-il quand je fais chauffer de l'eau pure avec un bec électrique ? » ne pointe aucune direction particulière à suivre pour répondre aux questions.

Ainsi, la structure de la fiche et de la consigne orale de l'enseignant laisse penser qu'il est attendu voire encouragé que les élèves fassent état de leur idées issues de la vie quotidienne. C'est d'ailleurs dans ce sens que pointe le discours d'introduction de l'enseignant à la fiche d'hypothèses : « je vous demande pas de donner la bonne réponse/ [mais] celle que vous pensez être la bonne » (S3, min 16). Cette orientation volontaire des élèves vers l'utilisation des

connaissances communes est susceptible d'engendrer des rapports aux objets non-pertinents que l'enseignant devra négocier pour parvenir aux enjeux de savoir visés.

Analyse a priori de la question d.

La question d. demande aux élèves de tracer « l'allure approximative de l'évolution de la température en fonction du temps que l'on obtient quand on fait chauffer de l'eau pure sur un bec électrique » en s'aidant des réponses fournies aux questions a., b. et c.

Sachant que les élèves de ce niveau ne disposent pas de la notion de graphe comme représentation spatiale des variations d'une fonction mathématique, les élèves rencontreront inévitablement quelques difficultés dans l'exécution de cette tâche. En effet, pour être capable de tracer l'allure du graphe d'un phénomène physique, et non pas le graphe en lui-même, il faut être capable d'abstraire de la multitude d'informations que donneraient le graphe entier les quelques informations nécessaires à la construction de l'allure : en général, les variations, ainsi que certains points remarquables (les extrema, les points initiaux et finaux, etc). Cette sélection dépend également du phénomène physique dont on veut reproduire l'évolution et il est souvent nécessaire d'en avoir quelques connaissances préalables : par exemple, dans le cas de l'ébullition de l'eau, il n'est pas besoin de connaître de données temporelles remarquables (sur l'axe des abscisses, donc) pour tracer une allure qui fait sens au niveau du modèle visé (celui du palier de température). En effet, le palier de température se fait toujours à 100°C , quel que soit la vitesse de montée de la température (celle-ci étant dépendante de la puissance de la source de chaleur disponible, donnée contingente ici).

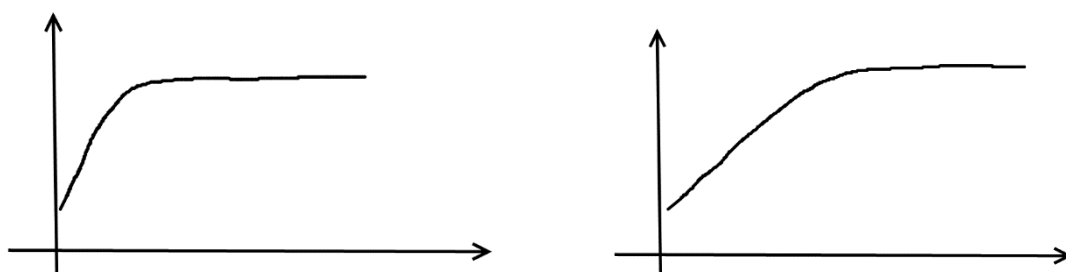


Figure 44 : Deux allures de graphe pertinentes pour modéliser le phénomène d'ébullition

Ainsi, bien que très différents, ces deux graphes (cf. Figure 44) pourraient être considérés comme acceptables scientifiquement : seul quelqu'un qui maîtrise (au moins partiellement) les modèles visés peut savoir que l'échelle temporelle n'est pas importante dans ce cas précis et que seule l'ordonnée du point d'ébullition compte (et non pas le moment du début de l'ébullition).

Or, les élèves ne possèdent ni les ressources en mathématiques (les notions d'abscisse, d'ordonnée, d'extremum, de variations d'une fonction ne sont abordées qu'à la fin du collège) ni les ressources en physique (leur connaissance a priori du phénomène physique en jeu est limitée) nécessaires afin de construire l'allure du graphe.

D'autre part, dans la séance précédente, l'enseignant leur a montré, à travers la fiche-méthode « Comment tracer un graphique à partir de données expérimentales ? » (cf. 10.4.1), une façon

de construire un graphe, point par point, lorsque le tableau des abscisses et ordonnées de quelques points est à disposition. Or, cette méthode de construction d'un graphe entre en opposition avec la méthode de construction de l'allure d'un graphe (se raccrocher à quelques points remarquables obtenus par la connaissance d'une modélisation sommaire). Il est possible que les élèves aient des difficultés à percevoir les différences dans le contrat didactique à l'œuvre dans la question d. par rapport à celui présent lors de l'étude de la fiche-méthode.

L'enseignant est d'ailleurs conscient de cette difficulté car il précise, dans son discours d'introduction à la question d. de la fiche d'hypothèses : « la dernière chose c'est pas la plus facile/ je veux que vous me traciez l'allure du graphique/ alors l'allure du graphique ce n'est pas tracer un graphique toutes les étapes/ (...) / moi ce que je vous demande c'est pas de me faire toutes les étapes/ c'est de me faire la dernière étape/ c'est-à-dire le lissage/ au départ aujourd'hui l'eau elle est peut-être à 15°/ donc quand je vais la mettre ici dans mon récipient elle est à 15°/ vous allez la mettre sur le bec électrique/ il faut me dire ce que va faire la température/ voilà/ si elle monte si elle descend il faut que je puisse le voir sur ce graphique/donc moi je vais prendre une exemple » (S3, min 20). À la suite, l'enseignant illustre ce qu'il entend par « l'allure d'un graphe » en dessinant au tableau l'allure de l'évolution de la température extérieure pendant une journée d'été. Enfin, il conclut : « je veux pas de graduations/ je veux que des points particuliers », sans préciser pour autant la nature et les conditions d'obtention de ces points particuliers.

Analyse a priori de la question b.

La question b. est constituée de deux parties : « Qu'observe-t-on pour l'eau au bout d'un moment ? À quelle température cela se produit-il ? ».

La première partie a une portée tellement ample qu'on peut s'attendre à une diversité très importante de réponses : on peut imaginer des observations variées, plus ou moins en accord avec le modèle visé, plus ou moins centrées sur le phénomène d'ébullition (des vaguelettes, des bulles, du bouillon, des remous, une baisse du niveau de l'eau, un changement d'apparence de l'eau, de la fumée, de la vapeur, du brouillard, une ébullition, une vaporisation, une évaporation, etc.).

La deuxième partie de la question est particulièrement intéressante puisque c'est la seule qui cherche à faire le lien entre les observations anticipées et une température précise, prémisses nécessaires à la modélisation en termes de palier de température. Mais, il est probable que certains élèves soient déconcertés par cette question : en effet, comment savoir à quelle température les bulles/le brouillard/le bouillon/ etc. apparaissent ? Sur quel critère baser son raisonnement ? Pour certains élèves, il est possible que cette question se résume à un jeu de devinettes. Pour les autres élèves, ceux qui ont répondu l'ébullition à la première partie de la question ou qui ont deviné dans les interstices du contrat didactique que c'était bien ce phénomène qui était à l'étude, il est toujours possible de se baser sur une connaissance commune, celle qui affirme que l'eau bout à 100°C (à condition de savoir que « l'ébullition » et « bouillir » désignent le même fait).

L'enseignant prévoit qu'à la fin de la réalisation de l'expérience d'ébullition et du tracé du graphe de l'évolution de la température de l'eau, les élèves reviennent sur leurs hypothèses et soient alors en mesure de les valider ou les invalider, tout en précisant qu'il n'est pas attendu de leur part qu'ils en effectuent une correction s'ils les estiment invalides.

10.4.2.2 Analyse a priori du dispositif d'enseignement relatif à la fiche « d'étude expérimentale de l'évolution de la température de l'eau au cours de sa vaporisation » et la consigne associée

Une fois la fiche d'hypothèses remplie, l'enseignant distribue la fiche d'« étude expérimentale de l'évolution de la température au cours de la vaporisation de l'eau » (cf. Figure 45, p. 279) en développant la consigne suivante : « donc aujourd'hui vous allez faire une expérience qui va durer 35 minutes/ où je vais vous donner un protocole à suivre/ et je vais évaluer votre travail/ donc je vais juste évaluer si vous respectez les consignes de sécurité/de chimie/si vous manipulez dans le calme en groupe de manière autonome/ et ensuite le troisième point si vous suivez bien le protocole que je vous demande (...) / dans chaque bassine y a tous les critères que je vais évaluer/ et bien sûr vous avez droit à votre cahier pour aller voir différentes choses/ et à la fin faudra aussi faire un graphique » (S3, min 2). On peut remarquer que c'est à ce stade-là que l'objet d'étude se dévoile puisque les termes « vaporisation » et « ébullition » font leur apparition sur la fiche.

Celle-ci est constituée de trois parties. La première établit la liste des compétences à l'œuvre lors de la réalisation de cette activité : « utilisation correcte du thermomètre », « tracer un graphique », « respect des consignes de sécurité », « suivre un protocole » et « travailler en équipe avec méthode et dans le calme ». Comme l'enseignant veut évaluer la maîtrise de ces compétences par les élèves au cours de la séance, il met à leur disposition une fiche qui fractionne les trois dernières compétences en « sous-compétences ». Par exemple, la compétence « respect des consignes de sécurité » est déclinée en cinq « sous-compétences » : « placer les cartables sous la pailasse », « manipuler debout et dans un espace dégagé », « porter des lunettes de protection si nécessaire » et « ranger le matériel en fin de séance ». Les deux premières compétences évaluées « utilisation correcte du thermomètre » et « tracer un graphique » ne sont pas subdivisées sur cette fiche mais ont fait l'objet de deux fiches-méthodes spécifiques : « comment mesurer la température d'un liquide ? » et « comment tracer un graphique à partir de données expérimentales ? » (cf. 10.4.1, p. 272).

La deuxième partie de la fiche explicite avec beaucoup de détails le matériel utilisé dans l'expérience et le protocole expérimental que les élèves doivent suivre : il s'agit de faire chauffer, à l'aide d'un bec électrique, l'eau contenue dans un ballon à fond plat, de relever sa température toutes les 30 secondes pendant 10 minutes dès qu'elle atteint 40°C et de tracer le graphique correspondant, l'échelle étant donnée. Il est également demandé aux élèves de noter la température à laquelle ils estiment que l'eau entre en ébullition. Un schéma du montage expérimental clôt cette partie.

Compétences travaillées :

- F4 suivre un protocole
- F5 utilisation correcte du thermomètre
- C7 tracer un graphique
- S1 respect des consignes de sécurité
- S3 travailler en équipe avec méthode et dans le calme

Etude expérimentale de l'évolution de la température au cours de la vaporisation de l'eau

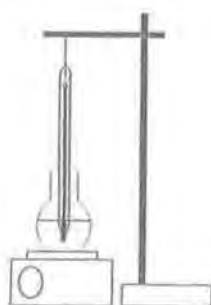
Matériel :

De l'eau, 1 ballon à fond plat, un support, un thermomètre, un chronomètre, des lunettes de protection, une blouse

Protocole :

- Remplir à moitié le ballon à fond plat avec de l'eau
- Placer le ballon sur le bec électrique
- Placer le thermomètre de manière à mesurer correctement la température de l'eau
- Placer le curseur du bec électrique sur la position max
- Surveiller la température
- A 40°C, enclencher le chronomètre et relever les températures toutes les 30 secondes (0,5 min) pendant 10 minutes
- Noter les valeurs dans le tableau ainsi que la température à laquelle l'eau entre en ébullition.
- Une fois les mesures prises, éteindre le bec électrique, le débrancher, sortir le thermomètre et le ranger. (laisser le ballon sur le bec, il sera rangé par le professeur)
- Demander la fiche graphique au professeur et construire le graphique en s'aidant de la méthode du cahier.

Schéma :



Mesures :

$T_{\text{ébullition eau}} = \dots\dots\dots \text{°C}$

Temps en minutes	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Température de l'eau pure en °C	40						
Temps en minutes	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5
Température de l'eau pure en °C							
Temps en minutes	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
Température de l'eau pure en °C							

Tracer le graphique qui représente l'évolution de la température en fonction du temps

- Ordonnées : 1 carreau = 10°C
- Abscisses : 1 carreau = 0,5 min (30s)

Figure 45 : La fiche d'étude expérimentale

La troisième partie de la fiche est constituée du tableau de mesures que les élèves doivent compléter au fur et à mesure de l'avancée de l'expérience.

Quelques remarques peuvent être établies à propos de la situation dans laquelle seront placés les élèves :

- Le protocole apparaît déconnecté des interrogations de la fiche d'hypothèses. En effet, les deux fiches sont distribuées indépendamment et aucun lien explicite n'est fait entre elles. De plus, leur titre (l'une se concentre sur « ce qu'il se passe lorsqu'on chauffe l'eau » et l'autre sur « l'évolution de la température de l'eau au cours de sa vaporisation ») peut

laisser penser que ce n'est pas tout à fait le même objet de savoir qui est à l'étude. Le protocole est imposé, sans aucune explicitation quant à sa raison d'être. À quel problème, quelle question répond-il donc ? L'articulation entre les deux fiches est laissée à la charge de l'élève.

- Il n'est pas demandé aux élèves d'observer les phénomènes se déroulant dans le ballon. L'élève peut réussir la tâche prescrite en se contentant de regarder le thermomètre et sans prêter attention à l'état de l'eau. Les élèves sont d'autant moins encouragés à cela qu'ils sont en situation d'évaluation et qu'ils savent qu'ils ne seront évalués que sur la liste de compétences fournie par l'enseignant : il est donc possible que certains élèves négligent ou ne trouvent pas d'intérêt à regarder avec attention le contenu du ballon et de ce fait, ratent des observations importantes pour l'établissement des modélisations à venir. D'autre part, sans une consigne stricte qui invite à formuler des connexions entre l'état de l'eau et l'évolution de sa température, il est probable que les observations que les élèves se risqueraient tout de même à faire soient très dispersées, trop pour que l'enseignant puissent s'y appuyer pour reconstruire les savoirs dans la classe. Ce qui est exigé des élèves est à la fois très limitatif (suivre le protocole à la lettre en se contentant de relever la température) et peu encadré (aucune exigence en termes d'observations d'où une dispersion possible des constatations).
- Néanmoins, il existe une ligne du protocole qui essaie de pousser les élèves à établir un lien entre l'état de l'eau et la température relevée : « noter (...) la température à laquelle l'eau entre en ébullition ». Cependant, comme le terme « ébullition » n'a pas été institutionnalisé précédemment dans cette classe, les élèves, pour répondre à cette question, vont devoir puiser dans leurs connaissances familières de ce terme. On peut donc prévoir une grande diversité dans les réponses : certains élèves feront peut-être correspondre l'ébullition à la période de forts remous de l'eau (vers 100°C), mais d'autres associeront ce terme aux premiers frémissements de l'eau (vers 80-90°C) ou aux premières petites bulles d'air (vers 40°C). Dans tous les cas, comme c'est uniquement la connaissance familière du terme qui est mobilisée, il est peu probable que les élèves fondent un lien entre l'ébullition et le changement d'état de l'eau liquide en vapeur d'eau.

10.4.3 Analyse de la phase N61c : Réalisation de l'expérience d'ébullition de l'eau & tracé du graphe

Nous avons choisi de suivre la dynamique des objets et rapports aux objets du milieu au sein d'un groupe lors de la réalisation de l'expérience d'ébullition : Ana, Mat et Max. Nous rappelons que les élèves sont censés prendre la température de l'eau toutes les trente secondes pendant dix minutes à partir du moment où l'eau atteint 40°C et reporter ces valeurs dans un tableau de mesures. Comme dans tous les autres groupes, Nathan surveille silencieusement la façon dont ils suivent diverses consignes (précautions génériques relatives à la tenue de la paillasse, à la manipulation correcte du thermomètre, au respect du protocole, etc.) afin de produire l'évaluation des compétences correspondantes. Puisque la situation se déroule dans un contexte d'évaluation, Nathan s'abstient d'intervenir afin de ne pas dévoiler tout élément qui

pourrait fausser l'impartialité de son évaluation. Les élèves se trouvent donc en situation de travailler seuls pendant la majeure partie de l'expérience. Dans cette situation, les objets qui apparaissent dans le milieu ne peuvent pas être institutionnalisés : au maximum, les élèves s'accordent sur leur sens et leur importance et ceux-ci font localement référence partagée. À défaut d'étudier la chronogenèse dans ce travail de groupe, nous nous concentrerons sur la façon dont les objets du milieu sont pris (ou pas) dans des enjeux communs que les élèves se donnent pour réaliser la tâche prescrite.

Extrait N1 : Précautions relatives au montage expérimental

Cet extrait se trouve tout au début de la réalisation de l'expérience. Les élèves n'ont pas encore déclenché le chronomètre et préparent leur paillasse et leur montage expérimental : en particulier, ils s'efforcent de positionner le thermomètre dans l'eau à l'aide d'un support.

- 192.**Max : (installe le thermomètre sur son support avec Ana) ça passe ou pas↑/ça touche là ou pas↑
193.Ana : ça touche/ça touche/ monte le (xxx)/ faut que tu le montes parce que là (...)
194.Max : (réajuste la position du thermomètre) voilà c'est bon/ là c'est bon/ [à propos du thermomètre qui ne touche pas les parois]/ là c'est bon↑// ça touche plus↑/ ça touche pas↑
195.Ana : là ça touche/ (Max réajuste la position du thermomètre) là c'est bon ça touche plus/(...)/ ça touche plus/ c'est bon
196.Max : là c'est bon//ça touche pas le fond/ c'est bon (se penche) ça touche l'eau ou pas↑/ normalement il est dans l'eau



Figure 46 : Ana et Max positionnent le thermomètre

Extrait N1 : Précautions relatives au montage expérimental - S3 [(0:41:01) - (0:41:55)]

Analyse [méso/topo/chronogenèse]

Les objets du milieu sont à forte composante matérielle, en lien avec la situation expérimentale. Ils portent sur le positionnement du thermomètre : ils constituent des indicateurs à propos du rapport à l'objet « position correcte du thermomètre » que les élèves construisent dans la situation.

Max accroche le thermomètre sur son support puis sollicite l'aide d'Ana pour lui faire un retour sur sa position dans le ballon d'eau (TdP 192), ce qu'elle exécute en reprenant les mêmes objets verbaux que Max (« ça touche/ça touche plus », TdP 193). Plusieurs réajustements successifs sur ce mode se produisent (TdP 194, 195). Leurs gestes montrent qu'ils s'assurent ainsi que le thermomètre ne touche aucune des parois du ballon (TdP 192 à 195) tout en étant suffisamment immergé dans l'eau (TdP 196).

La position correcte du thermomètre qui apparaît de façon implicite dans les échanges est celle dans laquelle il est éloigné des parois du ballon et son réservoir complètement immergé dans l'eau.

Au niveau topogénétique, l'enseignant étant absent dans cet extrait, les différents topos des élèves se définissent par négociation interne. Au sein du groupe, l'action conjointe d'Ana et Max se dévoile à travers la forte coordination de leurs actions respectives (pour Max, décaler le thermomètre vers le haut ou le bas en fonction du retour d'Ana ; pour Ana, vérifier la position

du thermomètre dans l'eau après les réajustements de Max). Le rapport à la « bonne » position du thermomètre est partagé localement entre ces élèves et a donné naissance à un enjeu commun pour Max et Ana qui s'attribuent spontanément des responsabilités respectives afin d'atteindre cet enjeu partagé.

Interprétation de l'Extrait N1

Le rapport à l'objet « la position correcte du thermomètre » n'est pas un produit inédit de la situation puisque un rapport similaire vient, en fait, d'être institutionnalisé dans le collectif : lors de l'étude d'une fiche-méthode précédant l'expérience d'ébullition, l'enseignant a montré les précautions à prendre pour effectuer une mesure correcte avec un thermomètre, incluant la position adéquate de celui-ci dans le liquide dont on veut mesurer la température (cf. 10.4.1, Figure 42).

Les objets de l'Extrait N1 restent très pratiques, orientés par les attentes explicites de l'enseignant portant sur les conditions de réalisation de l'expérience. Néanmoins, les rapports à l'objet « la position correcte du thermomètre » apparaissent de façon prolongée et récurrente dans tous les groupes de la classe : en particulier, les élèves se montrent très anxieux lorsque les remous de l'eau apparus lors de l'ébullition forcent le thermomètre à entrer en contact avec les parois (et donc, à violer la règle de la Figure 42, p. 273 : « s'assurer que le réservoir ne touche aucune paroi »). C'est cette idée qui est communiquée majoritairement à l'enseignant lorsqu'il passe dans les groupes.

Les rapports établis aux objets du milieu par ces élèves sont donc en adéquation avec la référence commune fraîchement institutionnalisée dans la classe. Ils témoignent de l'interprétation des élèves sur ce qu'il est important de considérer dans la situation et reflètent certaines facettes du contrat didactique.

Extrait N2 : Constatations diverses

Les élèves ont commencé l'expérience. L'eau est aux alentours de 50°C. Ana donne un signal toutes les 30 secondes, ce qui déclenche le relevé de la température de l'eau par Mat et sa prise en note par Max.

170.Mat : regardez ça commence à faire **de la fumée/** ça commence à faire **de la buée/ l'eau se vaporise**

171.Ana : attends tends tends/ il est 40 [s]

172.Max : 45[s]↑//

173.Ana : ben c'est 45[s]

174.Max : tu dis à une minute hein↑

175.Ana : ouais je sais

176.Max : à 50[s] au pire/ comme ça on est pouuuu

177.Ana : à 50[s] tu commences à regarder mais/ là il est 53 54 55[s]

178.Max : c'est à combien↑

179.Mat : 51 [°C]

180.Ana : 58[s]/59[s]/ Stop

181.Mat : 52/ 52/52[°C]

182.Ana : 52[°C]

183.Max : (note) **il monte à chaque fois de 5 degrés ma/ au moins/ au moins/attends donc là c'est à 30/ à 1 minute 30**

184.Mat : regardez l'eau/ **ça s'est une petit peu flouté/** (Max et Mat se regardent de part et d'autre du ballon) hein Titou je te vois à l'envers hein

185.Max : *elle devient trouble un peu*
186.Ana : *je suis à 20[s]/ je suis à 23[s]*
187.Mat : *y a des mini-bulles*
188.Ana : *je suis à 25[s] là*

Extrait N2 : Constatations diverses - S3 [(0:48:47) - (0:49:37)]

Analyse [méso/topo/chronogène]

Les objets principaux du milieu portent sur des éléments de prise de mesure (le décompte de l'intervalle du temps, la restitution de la température, l'établissement d'un plan d'action pour la prise de mesure, etc.). À l'aide du chronomètre, Ana prend en charge le décompte du temps (TdP 166, 168, 172, 175, 181, 183). Mat relève la température (TdP 174, 176). Max complète le tableau de mesures (TdP 178). De plus, Max demande à Ana de prévenir quelques secondes avant le décompte complet du temps (« à 50 secondes » ; TdP 171), idée à laquelle Ana souscrit (« là il est 53 54 55[s] », TdP 172). Elle demande alors à Mat de « commencer à regarder » la température (TdP 172). Mat s'exécute au TdP 174 (« 51°C »). Au final, l'objet « 52°C », qui correspond à 1 minute, apparaît dans le milieu (TdP 177). Cette température est notée dans le tableau de mesures (TdP 178). Ces objets montrent, en creux, les conditions que les élèves estiment satisfaisantes afin d'obtenir une prise de mesure de température précise.

Mais plusieurs autres objets non-relatifs à la prise de mesure apparaissent également (les objets secondaires, en gras dans l'extrait) :

- des observations sur l'eau ou sur le montage expérimental : présence de « fumée » et de « buée » (TdP 165), d'une eau qui devient « floutée » (TdP 179) et « trouble » (TdP 180), de « mini-bulles » (TdP 182) ;
- d'une interprétation des observations : « l'eau se vaporise » (TdP 165) ;
- d'une tentative de généralisation du degré d'augmentation de la température de l'eau à chaque mesure : « il [la température indiquée par la thermomètre] monte à chaque fois de 5 degrés au moins » (TdP 178).

Les objets principaux (qui reflètent un rapport à l'objet « prise de mesure satisfaisante de la température ») sont partagés entre les élèves et sont pris dans une topogénèse distribuée équitablement entre eux. En effet, ceux-ci mettent en place une stratégie coordonnée d'actions à l'aide, notamment, d'un rôle défini pour chacun d'entre eux (Ana à la mesure du temps, Mat à la mesure de la température et Max à la prise de notes) et d'une préparation attentive à la mesure (Ana prévient ses camarades un peu avant l'écoulement complet du temps afin que Mat ait déjà une idée de la température à observer). Cette coordination des responsabilités est révélatrice de l'enjeu commun que les élèves réussissent à se donner dans la tâche afin de fournir des mesures qu'ils estiment être les plus satisfaisantes possibles.

Au contraire, les objets secondaires se logent dans les interstices de cet enjeu principal et sont, pour la plupart, portés par un seul élève : Mat ou Max. Ils apparaissent de manière isolée, sans écho de la part des autres élèves. Le décompte du temps, le relevé de la température et le remplissage du tableau de mesures scandent inévitablement la discussion et prennent le pas sur l'observation ou l'interprétation de la situation (cf. analyse a priori 10.4.2). Les prescriptions

explicites de la fiche d'étude expérimentale empêchent d'aller au-delà de la production des objets principaux. Les objets secondaires ne diffusent pas (ou peu) à l'intérieur du groupe et restent des rapports personnels aux objets de la situation.

Constatations et observations diverses dans le reste du travail

Néanmoins, il est intéressant de remarquer que certains des objets secondaires réapparaissent à intervalle régulier dans le reste du travail, à l'initiative de Max.

Il amène plusieurs fois des objets relatifs au degré d'augmentation de la température à chaque mesure :

- « donc ouais ça monte de 5 degrés celsius » S3 - (0:49:50)
- « elle a monté de 5 degrés » S3 - (0:51:15)
- « il a monté que de 3 degrés » S3 - (0:53:35)
- « que 2 degrés là » S3 - (0:53:50)

Parallèlement, Max repère aussi des bulles à plusieurs températures (cf. Extrait N3 et Extrait N4) :

202.Max : *regardez y a des bulles là*
203.Ana : *je suis à 1 min 50*
204.Max : *des petites bulles*
205.Ana : *vas-y regarde/ 50[s]*
206.Mat : *63/ 63[°C]*

Extrait N3 : Les bulles à 63 °C - S3 [(0:48:47.6) - (0:49:37.3)]

224.Ana : *47[s] 48[s]*
225.Max : *ça fait des bulles*
226.Ana : *là je suis à 50[s]/ commence à regarder (La température est de 77°C)*

Extrait N4 : Les bulles à 77°C - S3 [(0:50:58.1) - (0:51:11.3)]

On constate que ces objets conservent leur statut d'objet secondaire dans le sens où ils ne trouvent pas d'écho chez les autres élèves. Ana reprend le décompte du temps (TdP 203, 205, 226) sans prendre en considération les observations de Max, ce qui témoigne du caractère marginal de celles-ci. Les autres élèves ne surenchérisent pas et ces objets ne deviennent pas des préoccupations communes au groupe.

Extrait N5 : Négociation de la température d'ébullition

L'extrait commence au début des frémissements de l'eau (aux alentours de 80°C).

236.Mat : *ok/ heu on est déjà à 80°C*
237.Max : *80°C↑*
238.Ana : *5[s] 4[s]*
239.Max : *ça bout là/ regarde*
240.Ana : *3[s] 2[s] 1[s]*
241.Mat : *82[°C]*
242.Ana : *82[°C] d'accord*
243.Max : *ça c'était pour 3 minutes 30/ 4 minutes*
244.Ana (*s'éloigne de l'expérience ; l'eau s'agite fortement*) : *attends moi je me mets derrière là/ ça me fait peur*
245.Mat : *on dirait du pop-corn/ on est à 85*

246.Max : *regarde regarde/ ça fait tic tic tic*
247.Ana : *je suis à 50 minutes/ 50 secondes pardon*
248.Max : *oui minutes non*
249.Mat : *regardez elle bout*
250.Ana : *55[s]*
251.Mat : *donc déjà on*
252.Max : *un petit peu/ un petit peu*
253.Ana : *56[s] 57[s] 58[s] 59[s] 4 minutes*
254.Mat : *88[°C]*
255.Max : *(note) 4 minutes (xxx)/ ouh là là ça bout*
256.Ana : *ça bout et c'est à 90 degrés que ça bout*
257.Max : *moi j'avais dit 100*

Extrait N5 : Négociation de la température d'ébullition - S3 [(0:51:33.0)-(0:52:31.0)]

Analyse [mésogenèse/topogenèse/chronogenèse]

Les objets principaux de la mésogenèse concernent la prise de mesure (TdP 240 à 255) : au final, la température de « 88 » (TdP 254) est évaluée comme correspondant à « 4 minutes » (TdP 255) dans le tableau de mesure. Les responsabilités concernant ces objets se révèlent réparties équitablement entre chacun des élèves. Ceux-ci reprennent un mode opératoire bien rodé à ce stade de l'enquête (répartition des postes, anticipation des mesures, etc.).

En pointillé, dans les intervalles entre les objets principaux, apparaissent également des objets qui concernent la détermination du moment de démarrage de l'ébullition (en gras, dans l'extrait) :

- L'objet « ça bout » est introduit par Max au TdP 239 (ce qui coïncide à une température de 80°C).
- Le même objet est repris quelques secondes plus tard par Mat au TdP 249 (pour une température de 88°C).
- Après l'introduction d'une modalité sur l'intensité de l'ébullition (« [l'eau bout] un petit peu », TdP 252), Max reprend l'assertion initiale (« ouh là là ça bout ») au TdP 255.
- Ana prend alors parti à son tour (« ça bout » au TdP 256) et relie le démarrage de l'ébullition avec la température qui lui correspond (« et c'est à 90 degrés que ça bout », TdP 256).
- Max constate aussitôt l'incompatibilité de la température d'ébullition avec ses prévisions initiales (« moi j'avais dit 100 », TdP 257).

À partir du moment où Max affirme que « ça bout » au TdP 239, les élèves (Mat dès le TdP 249, Ana au TdP 256) s'impliquent tous en donnant leur avis sur la question à un moment ou à un autre : la détermination du point d'ébullition devient un enjeu partagé entre les élèves. Dans ce processus, ils donnent à voir l'expression d'un certain tâtonnement dans l'évaluation du démarrage de l'ébullition (TdP 239 à 256) mais devant l'agitation croissante de l'eau, ils finissent par se rallier successivement à l'idée que l'eau entre bien en ébullition pendant la durée de cet extrait, avec néanmoins des différences quant à la localisation du début de l'ébullition (80°C, 88°C, 90°C). Aucun des élèves ne tente de justifier la rationalité de son jugement, de sorte que le pourquoi de la localisation de l'ébullition à telle ou telle température reste dans

l'univers personnel de chacun. Donc, même si l'enjeu de la détermination de la température d'ébullition est partagé et aboutit bien à un consensus, ce manque d'étayage témoigne de l'existence de milieux cloisonnés entre les élèves et d'une faible coordination dans la manière d'atteindre l'enjeu commun.

Faute d'une intervention de l'enseignant, les élèves restent dans l'incertitude à propos de cette température.

Lorsque plus tard, les élèves s'apercevront que la température d'ébullition était effectivement demandée sur la fiche (ce qu'ils ignoraient au moment de la négociation de la température d'ébullition), ils choisiront de noter 90°C. (cf. Figure 47) :

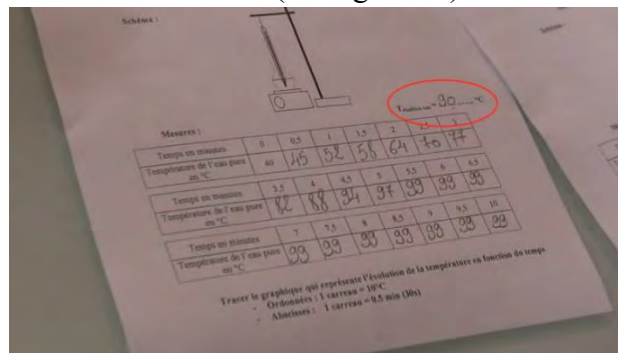


Figure 47 : Notation de 90°C comme température d'ébullition sur le tableau de mesures du groupe Ana, Mat, Max

Extrait N6 : Constat de la stagnation de la température de l'eau

L'extrait commence au moment où la température de l'eau cesse d'augmenter.

- 290.Ana : 5[s] 6 [s] 7 [s] 8 [s] 9[s] 10[s]
 291.Mat : 99[°C]
 292.Max : que de 2 degrés là (...)
 293.Mat : ça stagne/ça stagne/ça monte plus
 294.Ana : 50[s]
 295.Mat : ça monte plus
 296.Ana : 50[s]
 297.Mat : ça monte plus
 298.Max : on est à 100°C↑
 299.Ana : 55[s] /56[s] /57[s] /58[s] /59[s] /60[s]
 300.Mat : 99[°C]/ça monte pas/regarde/ça monte pas (Anna se penche)
 301.Max : t'es sûr que c'est pas 100 ↑
 302.Mat : 99[°C]
 303.Ana : 99[°C]/non 99[°C]//ça stagne à 99[°C]
 304.Max : moi j'avais dit 100/que ça peut pas aller à plus de 100/j'avais dit
 305.Mat : ça fume là/ça fume (...) ça a toujours pas bougé
 306.Ana : c'est en train de moins heu
 307.Mat : Titou tu peux tout/ sur tout/tout tu peux mettre 99
 308.Max : non/ça va descendre je pense après
 309.Ana : 30[s] / 99[°C]/ (xxx)
 310.Max : peut-être que ça va descendre après/c'est pour ça il vaut mieux/si ça se trouve il/comme il s'habitue/il s'habitue (xxx) non ↑
 311.Ana : non tais-toi toi
 312.Mat : 50[s] /52[s] /53[s] / on va être à sept minutes/99[°C] toujours/ça a pas bougé d'un poil/mais tu sais tu as juste la barre et ça s'arrête pile la
 313.Ana : 99[°C]
 314.Mat : pile là
 315.Ana : 99[°C]

316.Mat : tu sais comme si en fait il avait un mur qui le retenait (rires de Ana)

317.Max : mais tais-toi

Extrait N6 : Constat de la stagnation de la température de l'eau - S3 [(0:53:31.5)-(0:55:19.2)]

Analyse [méso/topo/chronogénèse]

La mésogénèse est d'abord nourrie d'objets qui concernent la stagnation de la température (en gras, dans l'extrait) : « ça stagne », « ça monte plus », « ça a toujours pas bougé » sont trois objets introduits de façon répétée par Mat (qui est celui qui recueille la température) tout au long de l'extrait (TdP 293, 295, 297, 300, 305, 312). Ana y accole une température (« ça stagne à 99 » au TdP 303). Un consensus s'installe à propos de cet objet qui semble aller de soi pour tous les membres du groupe.

Une fois reconnue la stagnation de la température, Max cherche à s'assurer que la température de stabilisation n'est pas 100°C (« t'es sûr que c'est pas 100 », TdP 301) et reconnaît, une fois encore, un décalage entre ses prévisions et une température de stabilisation de 99°C (« moi j'avais dit 100/que ça peut pas aller à plus de 100/j'avais dit », TdP 304). Cet enjeu de vérification de la température ne trouve pas d'écho chez les autres élèves, qui se montrent indifférents aux questionnements de Max. L'enjeu de Max ne se transforme pas en enjeu commun et quitte rapidement le devant de la discussion.

Quelques échanges installent des objets relatifs aux futures températures de l'eau :

- Max demande à Mat de remplir l'entièreté du tableau de mesures avec la valeur 99 : « sur tout/tout tu peux mettre 99 » (TdP 307)
- Max imagine la possibilité que la température de l'eau descende (TdP 308, 310) puisque « si ça se trouve (...) il s'habitue » (TdP 310).

Après ces deux prises de position opposées émises par Mat et Max, les échanges sont subitement coupés par Ana (« tais-toi, toi », TdP 311).

Enfin, un dernier objet, introduit par Mat, s'attache à caractériser la stagnation de la température en la reliant au thermomètre (« tu as juste la barre [la graduation du thermomètre] et ça s'arrête pile là (...) comme si en fait il avait un mur qui le retenait », TdP 312, 316). Max refuse absolument de considérer cet objet (« mais tais-toi », TdP 317).

Le partage topogénétique qui s'opère pour les trois groupes d'objets de cet extrait est donc similaire. Un des élèves introduit spontanément un objet qui dépasse les injonctions de la fiche d'étude expérimentale ; cet objet concerne, par exemple, le futur des températures de l'eau ou l'origine du palier de température ; cet objet n'arrive pas à s'installer durablement dans le milieu car les autres élèves manifestent indifférence et/ou hostilité à son égard, suggérant qu'il n'est pas pertinent par rapport à la situation dans laquelle ils sont placés ; par conséquent, l'origine du palier de température ne trouve pas sa place dans la discussion et ne se transforme jamais en enjeu commun, alors même que le palier semble provoquer un étonnement chez certains élèves du groupe.

Interprétation et synthèse des différents extraits

Durant la réalisation de l'expérience d'ébullition, deux ensembles d'objets sont introduits dans le milieu (local) du groupe observé :

- D'abord, les objets qui apparaissent de façon prédominante dans les échanges et qui sont relatifs à l'installation correcte du montage expérimental et au recueil précis des températures de l'eau. Ils donnent lieu à des milieux relativement bien partagés et à des enjeux communs atteints à l'aide de stratégies coordonnées entre les élèves. Ils s'appuient sur des éléments récemment institutionnalisés dans la référence commune. Ces objets principaux scandent le temps de l'expérience et ne peuvent laisser la place qu'à des bouts discontinus de discussion sur d'autres thèmes.
- Les objets secondaires, qui se logent dans les interstices des objets principaux, constituent des observations liées à l'état de l'eau ou à des prévisions sur l'évolution de sa température. Ils donnent lieu à des milieux qui se recouvrent peu et à des enjeux personnels qui ne diffusent pas à l'intérieur du groupe.

Cette séparation bien nette entre deux types d'objet peut s'expliquer par : 1) le contrat didactique en jeu ; 2) le contexte évaluatif.

- Les élèves évaluent ce qui est important à considérer dans la situation en fonction des normes installées précédemment dans la classe. Rappelons que trois « fiches-méthodes » ont préparé la réalisation de l'expérience. L'une d'entre elles détaille la manière correcte de lire une mesure sur un appareil graduée (avec, comme exemple principal, le thermomètre). Une autre introduit les précautions à prendre lors la mesure de la température d'un liquide (cf. Figure 42, p. 273). La nature des contenus de ces fiches-méthodes pousse les élèves à considérer que ce qui est attendu d'eux concerne le soin avec lequel ils réalisent l'expérience et recueillent les données, à juste titre d'ailleurs, car c'est exclusivement ce qui est évalué par l'enseignant (cf. Figure 48):

Manipuler en suivant un protocole		1	2	3	4	5	6	7	8
1	Réaliser l'expérience de vaporisation de l'eau								
2	Position thermomètre								
3	Prise des mesures								
4	Notation des mesures								
	Total / 9								

Figure 48 : Extrait de la fiche d'évaluation de l'enseignant

- Le contexte évaluatif renforce encore plus cet aspect discriminatoire de ce qui a légitimité d'apparaître dans le milieu : du point de vue des élèves, il s'agit de comprendre finement les attentes de l'enseignant pour obtenir une bonne note, quitte à se concentrer étroitement sur la fiche distribuée et évacuer brutalement du milieu ce qui n'y est pas directement demandé. Selon eux, les objets secondaires dépassent du contrat : autrement dit, leur interprétation de la situation ne leur permet pas de considérer ces objets comme pertinents. Or, et là est le paradoxe, ces objets se révéleront cruciaux lorsqu'il s'agira de construire

le modèle du palier de température. Les exigences à court terme de l'enseignant, finement décryptées par ce groupe d'élèves, les empêchent de se concentrer sur ce qui deviendra pertinent dès la fin de la réalisation de l'expérience.

Par conséquent, même si les objets secondaires ont une existence courte et précaire et restent confinés dans l'univers personnel de chaque élève, il est intéressant de les recenser à la lumière de leur potentiel devenir dans la discussion collective :

- Les bulles sont localisées à plusieurs températures (52°C, 63°C, 77°C). Elles ne sont pas explicitement repérées lors de l'ébullition. Elles ne sont pas reliées à des poches de gaz (air, vapeur d'eau ou autre). Différentes catégories de bulles ne sont pas envisagées.
- La référence au phénomène d'ébullition peut être décelée à travers l'objet « ça bout ». L'ébullition est repérée suivant les élèves du groupe dans une tranche de température allant de 80°C à 90°C, ce qui correspond au moment à partir duquel de grosses bulles de vapeur se forment en bas du ballon (là où la température est déjà de 100°C) puis se condensent à nouveau sans atteindre la surface. L'ébullition n'est jamais associée au changement d'état liquide-gazeux que subit l'eau (vaporisation). On suppose que ces élèves se représentent l'ébullition comme le moment où débutent les « forts » mouvements d'agitation de l'eau. L'appréciation de la vigueur des mouvements de l'eau qui donne le signal de l'ébullition est relative à chaque élève. Dans ce cadre, il est intéressant de constater que d'autres groupes d'élèves ont localisé le début de l'ébullition très tôt dans l'expérience (38°C), au moment de l'apparition des petites bulles d'air (cf. Figure 49):

Mesures :		<div style="text-align: right; border: 1px solid red; border-radius: 50%; padding: 2px;"> Ébullition eau = 38 °C </div>						
Temps en minutes	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	
Température de l'eau pure en °C	40	47	54	60	66	73	80	
Temps en minutes	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	
Température de l'eau pure en °C	87	95	98	99	99	99	99	

Figure 49 : Notation de la température d'ébullition selon le groupe de Kilian, Mélodie, Daphnée

- La stabilisation de la température de l'eau est bien remarquée mais pas considérée comme un phénomène qui nécessiterait une élucidation. En outre, la simultanéité de la stabilisation de la température et du début de l'ébullition de l'eau n'est pas évoquée (et pour cause, l'ébullition est située avant que la température stagne).
- D'autres observations sont énoncées : de la fumée, de la buée, une eau troublée, etc.

De façon générale, l'ensemble des rapports aux objets de la situation se fondent sur des références issues de sources externes à la classe (famille, classes antérieures, etc.). Comme la consigne de la fiche ne donne aucune indication sur ce qu'ils sont censés regarder et que l'enseignant reste silencieux pendant toute la durée de l'expérience, les élèves ne peuvent pas faire autrement que de puiser dans leur répertoire familier pour produire du sens vis-à-vis de l'expérience. La nature des objets produits confirme ce qui avait été avancé dans l'analyse épistémologique : l'expérience d'ébullition est particulièrement difficile à interpréter, surtout

quand la consigne n'incite pas les élèves à produire de nouveaux rapports aux objets, et notamment à établir des connexions entre le comportement de l'eau et sa température. Parmi la diversité des objets produits, une mise à l'écart de certains et une transformation en profondeur des autres sont nécessaires pour aboutir à la connaissance visée c'est-à-dire au modèle du palier de température.

10.4.4 Analyse des phases N61b et N61d : Réponse aux questions de la fiche d'hypothèses et validation/invalidation de ces réponses après l'expérience d'ébullition

Avant la réalisation de l'expérience de l'ébullition, Nathan a proposé aux élèves de répondre aux quatre questions de la fiche d'hypothèses. À la fin de l'expérience, il leur demande de faire apparaître le caractère valide ou non-valide de chacune des quatre hypothèses, sans pour autant proposer de corrections le cas échéant. Ce travail de retour sur les hypothèses est mené individuellement avec une aide ponctuelle de l'enseignant. La consigne de Nathan implique qu'il estime que les élèves sont à présent en mesure de juger de la conformité de leurs hypothèses mais ne dévoile pas pour autant les éléments sur lesquels ils sont supposés se baser pour mener à bien ce travail.

Nous nous proposons, à travers l'investigation des productions écrites de la fiche d'hypothèses, d'examiner l'évolution des rapports que les élèves entretiennent avec les objets du milieu entre le début et la fin de l'expérience d'ébullition. Pour comprendre finement cette évolution, nous nous concentrons sur le parcours de deux élèves : Max, qui fait partie du groupe analysé précédemment et Paul, qui fait partie d'un autre groupe.

Le cas de Paul

Les réponses aux questions de la fiche d'hypothèses (cf. Figure 50, p. 291) montrent les principaux rapports à l'objet « eau chauffée » que Paul établit en imaginant l'eau mise à chauffer sur un bec électrique :

- « L'eau va chauffer » ;
- « L'eau va faire des vagues, ça se produit à 100°C » ;
- « L'eau pourra atteindre 920°C ».

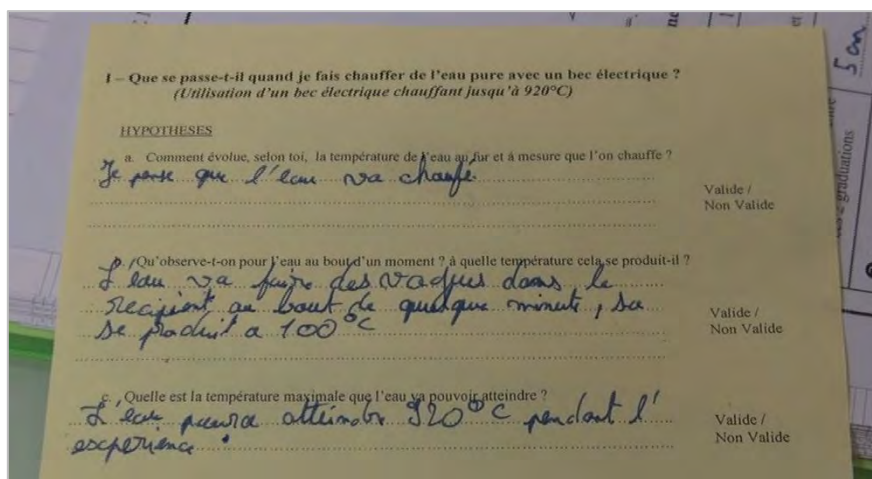


Figure 50 : La fiche d'hypothèses de Paul

À la fin de l'expérience d'ébullition, Nathan vient réguler les premières tentatives de Paul pour valider ou invalider ses hypothèses de départ.

Extrait N7 : L'enseignant régule les validations/invalidations d'hypothèses de Paul

- 395.**Ens : et là c'est valide ou non-valide↑/ qu'est-ce que tu as mis alors/ l'eau va faire des vagues dans le récipient au bout de quelques minutes/ ça se produit à 100°/ est-ce que ça a fait des vagues↑
396.Pau : ben oui ça a fait des vagues
397.Ens : ben alors voilà/ est-ce que c'était à 100°↑
398.Pau : oui
399.Ens : ben voilà/et l'eau va chauffer c'est juste ou pas↑
400.Pau : oui
401.Ens : ben voilà

Extrait N7 : L'enseignant régule les validations/invalidations d'hypothèses de Paul - S3 [(1:23:53.1) -(1:24:24.8)]

Nathan interroge Paul à propos de l'exactitude des deux premiers rapports aux objets que Paul a établis avant l'expérience, en se référant aux observations de l'expérience d'ébullition comme aide au jugement (« est-ce que ça a fait des vagues ? », TdP 395 ; « est-ce que c'était à 100°C ? », TdP 397 ; « l'eau va chauffer, c'est juste ou pas ? », TdP 399). Paul approuve les deux rapports aux objets qu'il a anticipés (TdP 396, 398, 400), suivi en écho par Nathan (TdP 397, 399, 401). Sur sa fiche d'hypothèses, Paul finit par valider l'idée que l'eau a chauffé et fait des vagues à 100°C.

Dans cet extrait, Nathan se maintient dans une position topogénétique basse caractérisée par un accompagnement distancé, voire une mise en retrait au profit de l'évocation des conditions de l'expérience d'ébullition : selon Nathan, c'est le rappel des événements de l'expérience qui doit amener l'élève à modifier ses rapports aux objets du milieu, et non pas le verdict de l'enseignant.

Même si les deux premiers rapports aux objets sont institutionnalisés localement pour Paul, nous discuterons plus bas s'ils correspondent réellement à une avancée des savoirs.

Le cas de Max

Les réponses aux questions de la fiche d'hypothèses (cf. Figure 51) montrent les principaux rapports à l'objet « eau chauffée » que Max établit en imaginant l'eau mise à chauffer sur un bec électrique :

- « L'eau va bouillir à partir de 100°C » ;
- « 100°C est la température maximale de l'eau ».

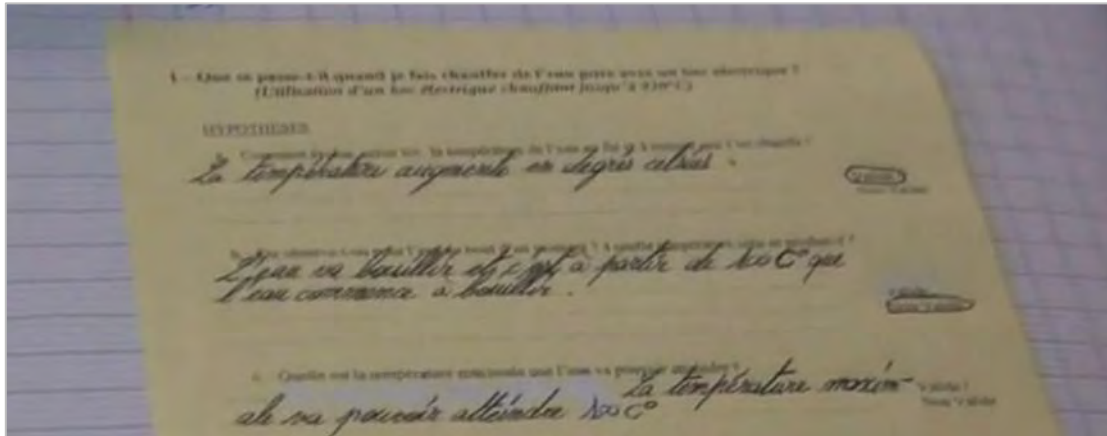


Figure 51 : La fiche d'hypothèses de Max

Après l'expérience d'ébullition, Max invalide l'objet : « l'eau va bouillir à partir de 100°C » (cf. Figure 51). Contrairement au cas précédent, l'enseignant ne vient pas réguler les tentatives de validation des hypothèses de Max : sa correction témoigne uniquement de sa modification autonome de ses rapports aux objets de la situation.

Interprétation et synthèse

Du côté de l'enseignant

L'enseignant se place en retrait total pendant l'expérience d'ébullition (afin de se conformer à sa posture d'évaluateur) et en guidance minimale (et irrégulière, selon les élèves) pendant les phases d'émission et de validation/invalidation des hypothèses.

Sa très faible ingérence dans la dynamique des groupes montre qu'il fait confiance à la situation proposée pour que les élèves puissent modifier pertinemment leurs premières hypothèses. Tout se passe comme si le milieu était assez robuste pour transformer à lui seul et dans le sens souhaité les rapports que les élèves entretiennent avec les objets du milieu. Autrement dit, l'expérience est censée avoir produit suffisamment de rétroactions pour que les élèves valident ou invalident leurs hypothèses de manière appropriée.

Dans le cas de Paul

Les rapports à l'objet « eau chauffée » que Paul développe dans ses prévisions initiales (la présence de « vagues à 100°C », etc.) sont révélateurs de ses vues personnelles, forgées au fur et à mesure de ses contacts avec le phénomène d'ébullition : c'est la description du phénomène avec des mots empruntés à la vie quotidienne. Les rapports « naïfs » de Paul ne sont pas mis à

l'épreuve par l'expérience : bien au contraire, ils sont confirmés par celle-ci, ce qui semble prévisible puisqu'ils possèdent une validité suffisamment satisfaisante dans la vie quotidienne et que la situation ne pousse pas les élèves à regarder l'expérience d'ébullition avec un regard différent de celui de la vie de tous les jours. Autrement dit, les rapports à l'objet « eau chauffée » dont témoigne Paul n'ont pas été contraints d'évoluer sous prétexte d'un cotoiement direct de l'expérience d'ébullition. Paul reste sur ses références premières pour interpréter l'expérience d'ébullition.

En les institutionnalisant, l'enseignant feint d'y reconnaître des propositions alignées avec son projet d'enseignement. Or, à un moment ou à un autre, il faudra s'en dégager afin d'arriver à discerner de la vapeur d'eau là où Paul ne voyait auparavant que des vagues : c'est une condition nécessaire pour aboutir à la modélisation en termes de palier de température. L'institutionnalisation des rapports aux objets de Paul, après l'expérience d'ébullition, va à contre-sens des enjeux de savoir visés : ce geste enseignant produit une stagnation locale de la chronogenèse.

Dans le cas de Max

Max fait partie du groupe étudié précédemment. Pour rappel, ce groupe (Ana, Mat, Max) :

- a situé l'ébullition aux alentours de 80-90°C : ce sont les débuts des frémissements de l'eau, qui correspondent aux grosses bulles de vapeur d'eau qui se forment en bas du ballon ;
- a relevé une température de stagnation de l'eau à 99°C.

Nous avons présenté les tentatives de Max pour attirer l'attention de ses camarades sur la température de 100°C. Il a pointé ainsi à plusieurs reprises les contradictions qui apparaissent :

- entre l'objet « l'eau bout à 90°C » sur lequel ces camarades finissent par s'entendre et l'objet « l'eau va bouillir à 100°C » qu'il a soutenu dans sa fiche d'hypothèses ;
- entre l'objet « ça stagne à 99°C » qu'Ana et Mat défendent et l'objet « 100°C est la température maximale de l'eau » issu de sa fiche d'hypothèses.

En dépit de toutes ces tentatives, le fait qu'il considère comme invalide l'objet « l'eau va bouillir à 100°C » montre qu'il a fini par s'adapter aux rapports aux objets « bouillir » et « ébullition » construits au sein de son groupe. Or, ces rapports demeurent dépendants d'une vision familière à propos de ce que l'ébullition représente, de ce que bouillir signifie (de « forts » remous de l'eau). Le jugement de Max sur sa propre production reste porté par des rapports aux objets issus de la pensée commune : il est seulement le produit d'une hybridation de ses propres références avec celles de ses camarades de groupe.

Certes, contrairement à Paul, réaliser l'expérience d'ébullition a fait évoluer les rapports de Max aux objets du milieu, mais de façon paradoxale, Max est amené à invalider un objet dans la lignée des enjeux de savoir visés (« l'eau bout à 100°C »), au bénéfice d'un objet moins pertinent (« l'eau bout à 80-90°C »). Ce déplacement établit d'ailleurs que l'objet « l'eau bout

à 100°C » n'était pas une connaissance fonctionnelle pour Max car elle ne lui a pas permis de faire sens des observables sur lesquelles elle est censée s'appliquer.

Conclusion

Selon Nathan, c'est à partir de la réalisation de l'expérience d'ébullition que les élèves sont censés tirer des conclusions qui impulsent des modifications dans les rapports aux objets initialement développés. Or, les résultats précédents montrent que le simple fait de réaliser cette expérience ne permet pas de modifier les rapports initiaux aux objets des élèves de telle façon qu'ils soient davantage susceptibles de mener vers la modélisation du palier de température. Les élèves corrigent les objets initiaux munis des mêmes références qu'ils avaient avant de réaliser l'expérience d'ébullition, références issues de la vie quotidienne ou des classes antérieures, en les combinant éventuellement avec celles de leurs camarades.

Autrement dit, contrairement aux attentes de l'enseignant (et mise à part la stabilisation de la température qui est toujours reconnue), la situation incluant la consigne, le matériel d'ébullition et la référence déjà-partagée n'est pas rétroactive : la modification des rapports aux objets après l'expérience ne s'accompagne pas d'une augmentation de leur pertinence vis-à-vis des enjeux de savoir visés.

10.4.5 Analyse de la phase N61e : bilan de l'expérience d'ébullition de l'eau

La séance suivante, l'enseignant annonce que la classe va faire une mise en commun afin d'expliquer ce qu'il s'est passé au niveau de la vaporisation. La discussion collective, qui occupe l'essentiel de la séance, aboutit à la modélisation du palier de température. Pour en arriver là, Nathan organise la discussion en plusieurs étapes qui, chacune, institutionnalise une facette du phénomène d'ébullition, et qu'il écrit sur le tableau noir :

- « La température augmente puis stagne autour de 100°C ».
- « Avant 100°C, on observe de minuscules bulles. À partir de 100°C, on observe de grosses bulles ».
- « Les minuscules bulles observées en dessous de 100°C sont des bulles d'air. Les grosses bulles observées à partir de 100°C sont des bulles de vapeur d'eau ».
- « La vaporisation de l'eau se fait à partir du moment où la température stagne : cela s'appelle un palier de température ».

Pour chacune de ces étapes, nous présentons un extrait qui expose la façon dont différents objets rentrent dans le milieu, sont transformés, co-construits et négociés par les acteurs de la relation didactique pour finir par constituer une référence commune.

Extrait N8 : Constat de la hausse suivie de la stabilisation de la température de l'eau

11. *Ens : Lil ↑/ si on fait l'évolution du début jusqu'à la fin qu'est-ce que tu as vu pour la température ↑*

12. *Lil : par rapport à l'eau ou ↑*

13. *Ens : on va dire d'abord par rapport au thermomètre et après on fera par rapport à l'eau*

14. Lil : ça monte et à un moment ça bloque
 15. Ens : ça bloque↓ tout à fait↓/ alors la température elle monte et après alors au lieu de dire bloquer on dit qu'elle se↑
 16. Els : stabilise/stagne
 17. Ens : qu'elle stagne allez c'est parti //donc on écrit est-ce que tous les groupes ont trouvé qu'au départ la température augmente et puis après elle stagne↑
 18. Els : oui
 19. Ens : c'est bon tout le monde a trouvé ça↑/personne a trouvé de choses différentes↑ puisque j'ai mis tous les groupes il faut que ce soit tous les groupes/ si y en a un qui trouve différent il faut qu'il me le dise//

Extrait N8 : Constat de la hausse suivie de la stabilisation de la température de l'eau - S4 [(0:25:44.9) -(0:26:58.2)]

Analyse [méso/topo/chronogénèse]

Nathan oriente la discussion en désignant un premier trait pertinent de l'expérience : les observations relatives à la température (TdP 11, 13). En réponse à cette focalisation, Lilian introduit l'objet : « ça monte et à un moment ça bloque » (TdP 14). Nathan se place en posture d'accompagnement pour faire évoluer ce premier objet : il remplace lui-même « ça » par « la température » (TdP 15), puis sollicite d'autres élèves pour remplacer « bloque » (TdP 15). Ceux-ci soumettent les objets « stabilise » (TdP 16) et « stagne » (TdP 16) à son appréciation. L'enseignant valide la dernière proposition. Ces modifications aboutissent à l'objet institutionnalisé final : « La température augmente puis stagne ».

L'enseignant prend pour point de départ l'objet introduit par Lilian puis s'appuie sur les suggestions de modification de certaines élèves pour construire les éléments de la référence partagée : le partage topogénétique est plutôt équilibré.

Interprétation de l'Extrait N8

L'objet introduit par Lilian « ça monte et à un moment ça bloque » possède une nature ambiguë : il peut se rapporter aussi bien à la mesure quantitative de la température de l'eau qu'à la hauteur de l'alcool du thermomètre qui « monte » dans le tube capillaire puis « bloque » (sous-entendant au passage que la source du blocage est à rechercher dans le thermomètre lui-même). Par conséquent, Nathan s'efforce de modifier cet objet afin de le rendre neutre par rapport à l'origine du palier de température. La prise en compte de l'objet initial amené par Lilian et la participation de quelques élèves à sa modification montre que l'évolution vers l'objet institutionnalisé (« la température augmente puis stagne ») s'opère de façon progressive. Cependant, la négociation des objets du milieu se fait par essai/erreur : les élèves soumettent des objets candidats au remplacement de « bloquer » et Nathan décide de leur pertinence, sans aucune justification de son jugement. Les critères de modification demeurent implicites.

Extrait N9 : Constat de l'existence de deux tailles de bulles

45. Ens : donc ensuite maintenant si on s'intéresse Lil à ce qu'il y a dans l'eau↑/ qu'est-ce qu'on voit dans l'eau↑ donc on met le ballon on s'assied/ normalement on n'a pas le droit de s'asseoir donc on le regarde avec ses magnifiques lunettes sa magnifique blouse et on regarde juste pas le thermomètre on regarde l'eau/ qu'est-ce qu'il se passe dans l'eau↑
 46. El : ben y a du y a des bulles
 47. Ens : des bulles↓/ la taille des bulles↑
 48. El : grosses
 49. Ens : elles sont grosses↑/ d'entrée elles sont grosses↑
 50. Els : non
 51. Ens : donc au début elles sont↑

52. *El : petites*
 53. *Ens : minuscules / petites ou minuscules↑*
 54. *Els : minuscules*
 55. *Ens : allez minuscules si vous voulez/ donc elles sont minuscules quand ça atteint 100°C ou avant que ça atteigne 100°C↑*
 56. *Els : avant*
 57. *Ens : avant↓ donc on écrit avant 100°C on observe des minuscules bulles//*
 (...)

 59. *Ens : au départ qu'est-ce qu'on voit↑ on voit ces minuscules bulles ↓/ et après est-ce qu'on voit toujours des minuscules bulles↑*
 60. *Els : non elles grossissent / elles grossissent petit à petit*
 61. *El : avec la chaleur ça fait de plus grosses bulles*
 62. *Ens : voilà est-ce que c'est petit à petit ou c'est d'un seul coup c'est des grosses bulles↑*
 63. *El : non c'est petit à petit/ le temps que la température*
 64. *El : c'est petit à petit*
 65. *Ens : petit à petit↑/ tout le monde a vu que c'était petit moyen moyen gros gros↑*
 66. *El : non*
 67. *Ens : ben je vous demande*
 68. *El : non*
 69. *Ens : au départ c'est petit et à partir de 100°C c'est comment↑*
 70. *Els : gros/moyen*
 71. *Ens : c'est gros hein à partir de 100°C/ c'est petit et quand tu dépasses 100°C d'un seul coup ça bouillonne (geste) / donc quand ça bouillonne c'est de grosses bulles ou de petites bulles↑*
 72. *Els : grosses*
 73. *Ens : donc à partir de 100°C on observe des grosses bulles /*

Extrait N9 : Constat de l'existence de deux tailles de bulles - S4 [(0:28:48.7) - (0:34:12.6)]

Analyse [méso/topo/chronogénèse]

Nathan oriente la discussion en désignant un deuxième trait pertinent de l'expérience : « ce qu'il se passe dans l'eau » (TdP 45). Un élève apporte l'objet « y a des bulles » (TdP 46), objet immédiatement repris et validé par l'enseignant (TdP 47). Nathan oriente de nouveau le cours de l'action, en incitant les élèves à se concentrer sur la « taille des bulles » (TdP 47). Nathan se place dans une position de surplomb topogénétique (monopolisation des tours de parole, questions fermées et inductrices de la réponse : TdP 48-57) pour arriver à dégager qu'« avant 100°C, on voit de minuscules bulles » (TdP 57).

Puis, plusieurs élèves introduisent des objets qui suggèrent que la taille des bulles varie ensuite proportionnellement avec le temps de chauffage :

- « [les bulles] grossissent petit à petit » (TdP 60) ;
- « avec la chaleur, ça fait de plus grosses bulles » (TdP 61) ;
- « c'est petit à petit le temps que la température », « c'est petit à petit » (TdP 63-64).

Nathan reprend une position de surplomb topogénétique pour évacuer du milieu cette idée de proportionnalité défendue par certains élèves et installer son idée d'une discontinuité franche entre des petites bulles qui seraient présentes avant 100°C et des grosses bulles présentes à partir de 100°C. Dans cet objectif, les objets qu'il introduit dans le milieu constituent une suite de questions de plus en plus fermées :

- « est-ce que c'est petit à petit ou c'est d'un seul coup que c'est de grosses bulles ? » (TdP 62) ;

- « petit à petit ? Tout le monde a vu c'était petit moyen moyen gros gros ? » (TdP 65).

Ce verrouillage du milieu, qui procède par surplomb topogénétique, finit par porter ses fruits : Nathan est finalement en mesure d'amener l'objet : « c'est petit et quand tu dépasses 100°C d'un seul coup ça bouillonne » (TdP 71).

L'objet institutionnalisé, tel qu'écrit au tableau par Nathan, est : « Avant 100°C, on observe de minuscules bulles. À partir de 100°C, on observe de grosses bulles ».

Interprétation de l'Extrait N9

Ce n'est qu'à ce stade que Nathan annonce que les observations liées au comportement de l'eau constituaient des observations remarquables : une partie implicite du contrat se dévoile. En effet, nous avons souligné qu'il n'existait aucune indication dans ce sens dans le milieu primitif, d'une part et que l'évaluation portait sur d'autres éléments de la situation (prise de mesures précise, suivi rigoureux du protocole, etc.), d'autre part. Ces caractéristiques illustrent la raison pour laquelle les élèves du groupe (Ana, Mat, Max), pris dans des enjeux évaluatifs, se sont volontairement empêchés d'aborder les thématiques du comportement de l'eau, en coupant brutalement toute tentative de développer des considérations à ce sujet. Ces élèves apprennent à ce moment qu'il n'était pas suffisant de prendre des mesures, compléter le tableau et tracer le graphe de manière rigoureuse mais qu'il fallait aussi regarder l'état de l'eau. La rupture du contrat, engendré par l'écart entre les attentes réciproques de Nathan et des élèves, passe inaperçu car elle n'entre pas dans le milieu. Sa nature « rétroactive » a pourtant des conséquences sur le milieu potentiel de la discussion collective : l'expérience d'ébullition s'étant déroulée antérieurement, ce qui n'a pas été remarqué est perdu et ne peut pas apparaître dans la discussion.

L'orientation ferme que donne Nathan à la discussion montre qu'il considère qu'il est important de valider l'idée que la taille des bulles rencontre une césure à 100°C : avant 100°C, ce sont de petites bulles et après, de grosses bulles. La volonté de l'enseignant d'imposer la discontinuité de la taille des bulles au détriment des élèves qui soutiennent une variation linéaire peut être expliquée à l'aune des enjeux de savoir visés. La coïncidence temporelle entre la stabilisation de la température et le changement d'état que subit l'eau est un préambule nécessaire à la construction de la modélisation en termes de palier de température : l'ébullition se doit donc d'être reconnue à 100°C (et surtout pas avant). La discontinuité de la taille des bulles fournit à l'enseignant un argument dans ce sens : la différence de la taille des bulles s'accompagne d'une différence de nature et seule les grandes bulles seraient de la vapeur d'eau.

La manière dont est introduite cette idée est marquée par le surplomb topogénétique de Nathan : celui-ci impose, sans aucune justification et alors-même que plusieurs élèves prétendent le contraire, l'idée que les grosses bulles apparaissent soudainement à 100°C. On suppose qu'il considère l'expérience d'ébullition suffisamment « parlante » pour que les deux types de bulles soient apparus de façon évidente aux yeux des élèves et que, si les élèves se trompent, c'est qu'ils n'ont pas été assez attentifs au déroulement de l'expérience. Son rôle est alors de pallier à ce manquement en leur fournissant d'autorité la réponse correcte. Or, nous avons développé dans l'analyse épistémologique l'idée que l'expérience d'ébullition voit se

succéder une variété de bulles tout au long du phénomène (bulles d'air dissous à partir de 30-40°C, bulles de vapeur d'eau qui se recondensent immédiatement vers 80-90°C, bulles de vapeur d'eau sous forme bouillonnante vers 100°C) : sans évoluer de manière tout à fait linéaire, la taille des bulles ne manifeste pas pour autant de discontinuité franche, contrairement à ce que prétend l'enseignant. En fait, celle-ci ne se laisse voir que pour qui connaît déjà le modèle du palier de température ! Même en admettant que les élèves ont prêté attention au comportement des bulles, la discontinuité de leur taille ne peut paraître que comme une imposition arbitraire de l'enseignant. Les élèves qui défendaient la thèse de la proportionnalité sont sommés d'adhérer à une position contraire à la leur, sans réelle justification. Mais des problèmes peuvent se poser pour d'autres élèves. En effet, Nathan affirme également que les grosses bulles synonymes d'ébullition apparaissent à la température de stabilisation, autour de 100°C. Or, le groupe Ana, Mat, Max découpait les deux phénomènes : il évaluait la température d'ébullition aux alentours de 80-90°C et la température de stagnation à 99 °C. Le même raisonnement s'applique pour le groupe Kilian, Mélodie, Daphnée qui évaluait l'ébullition à 38°C et la stagnation de la température à 99°C. Ces élèves se trouvent projetés dans ce nouveau milieu, sans avoir eu l'opportunité d'exprimer et de diffuser les rapports aux objets développés pendant l'expérience. Dernier exemple : c'est à cette étape que Paul, qui ne concevait que des vagues dans le phénomène d'ébullition, est maintenant projeté dans un milieu où il n'est plus question que de bulles. Dans tous les cas, l'écart (voire l'incohérence) entre les objets portés par les élèves lors des travaux de groupe et ceux institutionnalisés lors de la discussion collective s'avère important.

Extrait N10 : Mise en évidence de la nature des « petites bulles » et des « grosses bulles »

134. Ens : déjà une bulle/ qu'est-ce donc qu'une bulle dans un liquide↑/ déjà on va définir c'est quoi une bulle/Lil↑
135. Lil : de l'air
136. Ens : de l'air / est-ce que c'est forcément de l'air une bulle↑/donc tu as raison ça peut être de l'air mais ça peut c'est pas forcément de l'air/
137. Elf : un gaz
138. Ens : un gaz↓/donc le gaz c'est général/ l'air c'est un gaz particulier/ moi je préfère qu'on me dise le cas général c'est-à-dire une bulle dans un liquide c'est du gaz/ est-ce que c'est de l'air/ est-ce que c'est pas de l'air ça ça va être à vous de me le dire/ quand c'est de petites bulles au départ ça doit être quoi selon vous↑/ Monsieur Col comme ça sinon tu vas choper pardon attraper une crampe vas-y
139. Col : de l'air
140. Ens : de l'air/ pourquoi de l'air↑/ y a de l'air dans l'eau↑
141. Col : ben non mais
142. Ens : ben je sais pas tu me dis c'est de l'air
143. Col : je sais pas y a de l'air autour
144. Ens : y a de l'air autour/ est-ce que si tu vas sous l'eau toi y a de l'air↑
145. Col : ben non
146. Ens : non hein parce que si tu vas nager sous l'eau au bout d'un moment tu vas t'apercevoir qu'il y a plus d'air/est-ce que pour autant y a pas de l'air dans l'eau↑/ Monsieur Cha↑
147. Cha : ben c'est comme ça s'est vaporisé parce que comme l'eau s'est vaporisée ça devient du gaz
148. Ens : comme l'eau s'est vaporisée ça devient du gaz↓/ est-ce que les petites bulles sont déjà du gaz [veut dire : vapeur d'eau]
149. Cha : ben non
150. Ens : donc que pourrait être ces petites bulles↑ Monsieur Rou↑
151. Rou : ben si c'est déjà du gaz qui est dans l'eau

- 152.**Ens : je suis d'accord/ c'est du gaz dans l'eau/mais moi je te demande qu'est-ce que c'est comme gaz/ maintenant Monsieur Col n'a pas dit une idiotie// parce que c'est sûr que si vous et moi on va dans l'eau on n'arrivera pas à respirer et on va se noyer/ par contre est-ce qu'il y a pas d'autres êtres vivants qui peuvent aller dans l'eau et vivre↑
- 153.**Elf : les poissons mais on l'a vu en SVT
- 154.**Ens : ah ben voilà transversalité/ donc nous avons/qu'est-ce que tu as vu qu'est-ce qu'il font les poissons dans l'eau à part nager↑
- 155.**Elf : ils absorbent de de l'oxygène
- 156.**Ens : ils absorbent de l'oxygène grâce↑
- 157.**El : aux branchies
- 158.**Ens : aux branchies↓ donc cet oxygène il vient d'où↑
- 159.**Els : de l'eau/ des algues
- 160.**Ens : c'est pas de l'eau/ qu'est-ce qu'il y a qui est dissous dans l'eau↑
- 161.**El : du gaz
- 162.**Ens : et quel gaz↑
- 163.**El : de l'oxygène
- 164.**Ens : de l'oxygène c'est pas de l'oxygène
- 165.**Els : de l'air
- 166.**Ens : c'est de l'oxygène qui est lui-même dans l'air/donc en fait dans de l'eau même en fait dans ce verre d'eau ici (verse de l'eau dans un verre)/ on le voit pas mais il y a de l'air dissous/ donc quand je vais chauffer les premières petites bulles que je vais voir apparaître ça va être des bulles d'air qui vont partir/ la première chose quand je vais chauffer un liquide vous verrez plus tard pourquoi/ mais l'air qui est dissous il va avoir tendance à partir donc toutes les minuscules bulles qu'on voit au départ ce sont de l'air/
(...)
- 167.**Ens : par contre quand je vais atteindre les 100°C qu'est-ce qu'il va se passer à partir de ce moment-là↑/ Monsieur Cha↑
- 168.**Cha : l'eau va se vaporiser
- 169.**Ens : donc l'eau liquide va se vaporiser c'est-à-dire qu'elle va se transformer en quoi↑
- 170.**Cha : en gaz
- 171.**Ens : en gaz comment ça s'appelle l'eau à l'état gazeux ↑// Monsieur Lef↑
- 172.**Lef : vapeur
- 173.**Ens : de la vapeur d'eau↓ donc les grosses bulles qui sont ici est-ce que c'est de l'air↑
- 174.**Els : non
- 175.**Ens : non c'est des bulles de ↑
- 176.**Els : vapeur
- 177.**Ens : vapeur ↓donc petites bulles c'est de l'air dissous par contre à partir de 100°C c'est l'eau liquide qui se transforme en vapeur/ donc toutes les grosses bulles que ça bouillonne c'est des grosses bulles de vapeur/

Extrait N10 : Mise en évidence de la nature des « petites bulles » et des « grosses bulles » - S4 [(0:45:51.4) -(0:49:45.3)]

Analyse [méso/topo/chronogénèse]

Nathan oriente la discussion en désignant un nouveau trait pertinent : il s'agit de la nature d'une bulle (« qu'est-ce donc une bulle dans un liquide ? déjà, on va définir, c'est quoi une bulle ? », TdP 134). L'enseignant se place en surplomb topogénétique pour écarter la proposition d'un élève (« de l'air », TdP 135) et valider celle d'un autre (« un gaz », TdP 139-140).

Nathan oriente de nouveau le cours de l'action, en incitant les élèves à se concentrer sur la nature des petites bulles (« quand c'est de petites bulles au départ ça doit être quoi selon vous ? », TdP 138). Deux séries d'objets émergent de ce questionnement :

- Colas fait intervenir l'air du milieu environnant : « de l'air » (TdP 139), « y'a de l'air autour » (TdP 143).

- Charles sous-entend que les petites bulles sont constituées d'eau qui se vaporise : « comme ça s'est vaporisé parce que/comme l'eau s'est vaporisée ça devient du gaz » (TdP 147).

Toujours en position de surplomb topogénétique, Nathan ignore ces propositions (TdP 146-148) et puis en choisissant les objets des élèves qui sont en ligne avec son projet (« les poissons », TdP 155 ; « ils absorbent de l'oxygène », TdP 157) et rejetant les autres (« [l'oxygène vient] de l'eau », TdP 131, (« [l'oxygène vient] des algues », TdP 131), il amène l'idée que les petites bulles sont formées par l'air dissous dans l'eau qui s'échappe en premier quand on chauffe l'eau (TdP 152-166).

Enfin, il dirige la discussion sur ce « qu'il va se passer à partir de [100°C] » (TdP 167) et sollicite Charles. Celui-ci reprend exactement les mêmes objets que précédemment lorsqu'il était interrogé sur la nature des petites bulles : « l'eau va se vaporiser » (TdP 168) ; « [elle va se transformer] en gaz » (TdP 170). L'enseignant valide ces objets qu'il a largement contribué à construire (TdP 169, 171).

Au final, Nathan institutionnalise les deux objets suivants : « [les] petites bulles c'est de l'air dissous » (TdP 177) et « à partir de 100°C c'est l'eau liquide qui se transforme en vapeur/ donc toutes les grosses bulles (...) c'est des grosses bulles de vapeur » (TdP 177).

Interprétation de l'Extrait N10

L'extrait est caractérisé par le surplomb topogénétique de l'enseignant. Parmi les objets amenés par les élèves, Nathan choisit de relever ceux qui vont dans le même sens que les enjeux de savoir visés et rejettent ou ignorent les autres : aucun des deux gestes ne s'accompagnent d'une justification. Comme précédemment, la négociation du sens des objets procède par essai/erreur : les élèves soumettent un l'objet à l'appréciation de l'enseignant, celui-ci émet son jugement : si l'objet est validé, le « jeu » s'arrête ; s'il est invalidé, un élève propose un autre objet, etc. Une boucle s'ensuit : ce « jeu » continue jusqu'à ce que l'enseignant reconnaisse le « bon » objet, celui qui sert son projet. Parfois, Nathan se sert des aspects superficiels du contrat didactique pour arriver à ses fins. Ainsi, lorsqu'il est interrogé sur la nature des petites bulles, Charles prétend qu'elles sont le résultat de la vaporisation de l'eau. Nathan ignore son raisonnement. Plus tard, lorsque la nature des grosses bulles rentre dans le débat, Nathan sollicite de nouveau Charles : ce geste est une façon de lui signifier que la situation s'est transformée de telle façon que l'objet qu'il a introduit précédemment et qui avait été écarté, change de statut et devient maintenant attendu. C'est ce que Charles comprend d'ailleurs puisqu'il reprend mot pour mot sa première proposition. En utilisant ce genre de stratagème, en faisant participer les élèves pour répondre à des questions fermées, Nathan atténue l'apparence du surplomb topogénétique qui apparaîtrait pleinement s'il prenait la forme d'un exposé monologué, sans en annuler les conséquences du point de vue des élèves toutefois. C'est ce que nous appelons le surplomb topogénétique « déguisé », également à l'œuvre dans les deux extraits précédents.

L'enseignant demande aux élèves de se prononcer sur la nature des petites bulles, d'une part et des grosses bulles, d'autre part. Jusqu'à ce moment, la discussion portait sur les observations ;

à partir de maintenant, elle porte sur l'interprétation de ces observations. Il est alors étonnant de constater que bien que les enjeux de la discussion se modifient en profondeur, la dynamique de construction de savoirs ne change pas par rapport aux extraits précédents. La gestion topogénétique de Nathan demeure la même que dans les extraits précédents (surplomb topogénétique « déguisé ») alors même que du point de vue des élèves, ce qui est à discuter varie drastiquement. Nous avons montré que, mis à part la taille, il n'y avait pas de différence observable entre les deux types de bulles qui apparaissent : le fait que les premières soient de l'air et les secondes de la vapeur d'eau constitue un savoir que les élèves ne peuvent pas découvrir seuls. Le rôle de l'enseignant est capital à ce stade. Le « jeu de devinettes » qu'implique le surplomb topogénétique « déguisé » est vain : à moins de savoir déjà qu'il existe de l'air dissous dans l'eau, il n'est pas possible de l'inférer des observations ; il faut user de beaucoup d'artifices pour faire croire aux élèves qu'ils ont une part de responsabilité dans l'avancée des savoirs, comme le fait Nathan.

Quant aux élèves qui défendaient d'autres idées par rapport à la nature des bulles, ils sont contraints d'adhérer à la position soutenue par l'enseignant : Charles, en particulier, qui reconnaissait déjà de la vapeur dans les petites bulles, doit, pour répondre aux attentes de l'enseignant, faire rapidement volte-face pour n'en « voir » qu'à partir des grosses bulles. D'autres élèves, par exemple le groupe Ana, Mat, Max, ont bien reconnu les petites bulles du début mais ne les ont jamais associées à des poches de gaz : le fait qu'il s'agisse d'air n'est pas incompatible avec leurs points de vue mais en constitue un prolongement non-trivial. Comme dans l'extrait précédent, il existe un décalage entre les objets portés par les élèves et ceux institutionnalisés lors de la discussion collective.

Extrait N11 : L'eau se transforme en gaz à température constante

178. Ens : est-ce qu'instantanément l'eau dans votre ballon s'est transformée en gaz↑
 179. El : non
 180. El : non
 181. Ens : c'est-à-dire qu'en une fraction de seconde y avait plus d'eau dans le bec dans le ballon et tout s'est transformé en vapeur↑
 182. El : non
 183. Ens : donc ça ça prend un certain ↑
 184. El : temps
 185. Ens : et pendant tout ce temps-là que fait la température de l'eau ↑
 186. Els : elle augmente/stagne
 187. Ens : elle augmente ou elle stagne↑/ il faut choisir/
 188. Els : elle augmente/stagne
 189. Ens : donc est-ce qu'ici y a des grosses bulles↑ (montre la partie croissante de l'esquisse de graphe qu'il a tracé au tableau ; cf. Figure 52)
 190. El : ah ben non
 191. Ens : les grosses bulles c'est à partir de là (montre la partie constante du graphe ; cf. Figure 52)/ donc à partir du moment où l'eau se transforme la température↑
 192. Els : elle stagne
 193. Ens : elle stagne↓/ si on a compris ça on a tout compris/ donc le palier de température ça correspond à quoi/ qu'est-ce qu'il se passe pendant ce palier de température ↑
 194. El : eh ben l'eau stagne
 195. Ens : comment s'appelle ce changement d'état↑
 196. El : la vaporisation

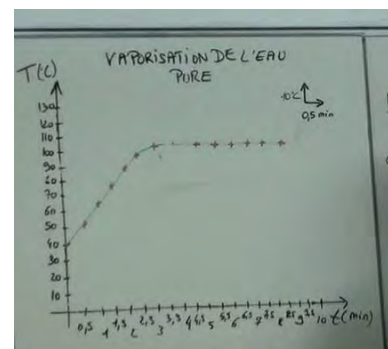


Figure 52 : Le graphe esquissé au tableau

Analyse [méso/topo/chronogène]

Nathan oriente la discussion en désignant un dernier trait pertinent : l'évolution de la température de l'eau lors de sa vaporisation (« pendant tout ce temps-là [le temps de la vaporisation] que fait la température de l'eau ? », TdP 184).

Deux objets incompatibles émergent dans le milieu :

- la température de l'eau « augmente » quand elle se change en vapeur d'eau durant l'ébullition (TdP 185, 187) ;
- la température de l'eau « stagne » quand elle se change en vapeur d'eau durant l'ébullition (TdP 185, 187).

Il détourne l'attention des élèves sur le graphe esquissé au tableau et situe les grosses bulles sur la partie constante du graphe : « les grosses bulles c'est à partir de là (montre la partie constante du graphe) » (TdP 190). Le dernier objet significatif qu'il amène est : « à partir du moment où l'eau se transforme [en gaz] la température stagne » (TdP 190, 192).

Nathan se place en posture de surplomb topogénétique « déguisé » (avec une participation minimale des élèves) afin de se débarrasser de l'idée d'une augmentation de la température pendant la vaporisation telle qu'elle est soutenue par plusieurs d'entre eux.

La modélisation du palier de température finit par être institutionnalisée : c'est une avancée majeure de la chronogénèse qui s'appuie sur les micro-institutionnalisations des extraits précédents, institutionnalisations qui concernent la reconnaissance du palier de température et la détermination de la nature des bulles qui apparaissent pendant l'ébullition.

Interprétation de l'Extrait N11

L'enseignant demande aux élèves de se prononcer sur l'évolution de la température de l'eau lorsque celle-ci se transforme en vapeur. Comme dans l'extrait précédent, il s'agit d'un travail d'interprétation des observations mais, contrairement à l'extrait précédent, les élèves possèdent des ressources à disposition. En effet, l'enseignant vient d'institutionnaliser que :

- À 100°C, la température de l'eau stagne.
- Avant 100°C, les petites bulles sont des bulles d'air. À 100°C, les grosses bulles sont des bulles de vapeur d'eau.

Les élèves possèdent donc les éléments principaux pour mener une partie de la réflexion demandée. Malgré ces ressources, certains élèves ne parviennent pas à franchir le pas supplémentaire : relier la vaporisation à la stagnation de la température de l'eau, c'est-à-dire au palier de température. Plusieurs raisons peuvent être invoquées. Hormis des difficultés avec la conceptualisation de la vaporisation, de l'état gazeux de l'eau ou bien des difficultés de lecture du graphe, soulignons que les ressources évoquées viennent juste d'être introduites dans le milieu et qu'elles se situent en opposition avec ce que les élèves ont pu produire pendant les travaux de groupes : les élèves observés (Ana, Mat, Max, Kilian, Mélodie, Daphnée) n'ont pas

reconnu la stabilisation de la température comme le siège de phénomènes particuliers pour l'eau. Pour répondre à la demande de l'enseignant, il leur faut revisiter l'expérience de l'ébullition avec un nouveau regard : or, il est difficile de réinterpréter des observations sur la seule base de la mémoire des faits. Il n'est pas étonnant que certains d'entre eux continuent à défendre l'idée que la vaporisation s'accompagne d'une hausse de la température de l'eau. Le surplomb topogénétique « déguisé » dont fait preuve Nathan les pousse à se conformer rapidement à l'objet institutionnalisé et continue à provoquer, pour ces élèves, une accélération du temps didactique et une discontinuité avec leur point de vue.

10.5 Synthèse de l'analyse des différents extraits : dynamique de construction des savoirs et schémas d'action

La dynamique de construction des savoirs dans la classe de Nathan est résumée dans les tableaux ci-dessous qui retracent l'évolution des objets principaux du milieu (O1, O2, O3, etc.).

Lors de la réalisation de l'expérience d'ébullition, les groupes d'élèves enrichissent la mésogénèse de la façon suivante :

Réalisation de l'expérience d'ébullition en groupe :

Groupe Ana, Mat, Max

- 1) Gestes d'Ana/Max afin de positionner correctement le thermomètre dans l'eau
- 2) Constatations diverses : Il y a des bulles (52°C, 63°C, 77°C) ; il y a de la buée, de la fumée (52°C) ; l'eau devient floutée et trouble (52°C) ; l'eau se vaporise (52°C) ; la température montre de 5/3/2 degrés à chaque mesure
- 3) L'eau bout à 80°C/88°C/90°C. La température d'ébullition est 90°C.
- 4) La température de l'eau stagne à 99°C. L'alcool du thermomètre s'arrête pile à la graduation comme si un mur le retenait.

Groupe Kilian, Mélodie, Daphnée

- 5) La température d'ébullition est 38°C.

Puisqu'une référence partagée dense existe à propos de la prise de mesure correcte de la température, les élèves du groupe Ana, Mat, Max interprètent la situation dans laquelle ils sont placés comme une évaluation de la rigueur avec laquelle ils se chargent des aspects pratiques de l'expérience : la plupart des objets (O1) attestent de la minutie et de la méticulosité qu'ils mettent en œuvre pour mener à bien le relevé des températures de l'eau en fonction du temps.

Les quelques constatations isolées qu'ils mènent (O2) s'éparpillent, faute d'un angle d'observation donné : bulles, buée, fumée, eau floutée et trouble, etc. La dispersion des constatations des élèves (O2) montre que la nature de la situation laisse toute liberté aux élèves pour estimer ce qui est pertinent à remarquer au-delà des injonctions du protocole expérimental. La tâche est définie de manière très directive pour tout ce qui concerne le relevé des

températures mais possède de contours flous pour tout ce qui concerne les observations du comportement de l'eau.

Comme dans ce groupe qui l'évalue à 99°C (O4), le fait que la température de l'eau stagne est largement reconnu au sein de la classe : au minimum, elle provoque l'étonnement des élèves qui la constatent. Certains d'entre eux, anxieux par le contexte évaluatif, rapportent à l'enseignant que « ça bloque » et lui demandent si ce phénomène est « normal » (autrement dit, attendu par lui).

L'ébullition est un phénomène familier aux élèves de cette tranche d'âge qui ont déjà été témoin des manifestations qu'il recouvre, sans jamais les objectiver vraiment. Puisque aucun critère de reconnaissance du début de l'ébullition n'est donné sur la fiche distribuée, les élèves se réfèrent aux repères issus de la vie quotidienne sur ce sujet. Le manque de précision de ces critères familiers pour estimer le démarrage de l'ébullition (est-ce le moment d'apparition des « grosses » bulles ou de la « forte » agitation de l'eau ?) explique pourquoi les groupes d'élèves le repèrent sur un large intervalle de température (O3) allant de 38°C à 90°C (mais pas à 100°C !). La simultanéité de la stagnation de la température et de l'ébullition n'est jamais exprimée.

À l'issue de l'expérience d'ébullition, les élèves reviennent sur leurs hypothèses initiales :

Émission d'hypothèses (avant l'expérience) puis validation/invalidation (après l'expérience)

Paul

6) L'eau va chauffer et faire des vagues à 100°C → **prédiction validée**

Max

7) L'eau commence à bouillir à partir de 100°C qui est sa température maximale → **prédiction invalidée** (température d'ébullition du groupe de Max = 90°C ; température de stagnation = 99°C)

Paul, qui a prévu de voir des vagues à 100°C, ne peut que constater que l'expérience d'ébullition lui donne raison : la manière familière de parler de l'ébullition (des vagues) continue naturellement à être valable pour une expérience supplémentaire, même si elle est menée en classe (O6). Max, qui a prévu que l'eau commence à bouillir à 100°C, doit faire marche arrière sous l'influence de son groupe qui a placé l'ébullition à 90°C. Max invalide donc un objet (« l'eau bout à 100°C ») qui sera institutionnalisé par l'enseignant la séance suivante (O7). Ainsi se dessine un malentendu qui se poursuivra dans la discussion collective : l'enseignant fait confiance au seul face-à-face des élèves avec la tâche expérimentale pour impulser des évolutions favorables dans les rapports aux objets du milieu alors que les élèves, sans indication supplémentaire, ne peuvent que maintenir le recours à des références familières pour interpréter l'expérience. Par ailleurs, le fondement des savoirs paraît de nature purement empirique : il s'agit de mettre en relation le phénomène d'ébullition, dont aucun critère n'est objectivement donné avec une observation, le palier de température. Or, au sein de la communauté scientifique

de référence, le raisonnement est inverse : c'est le palier de température qui sert à définir l'ébullition (pour peu que la pression soit connue).

Lors de la discussion collective, Nathan organise la discussion en plusieurs étapes bien délimitées qui mènent au modèle du palier de température :

Interprétation de l'expérience d'ébullition

- 8) La température augmente puis stagne autour de 100°C.
- 9) Avant 100°C, il y a de petites bulles et après 100°C, de grosses bulles apparaissent soudainement
- 10) Vs La taille des bulles augmente petit à petit.
- 11) Les petites bulles sont de l'air. Les grosses bulles sont de la vapeur d'eau
- 12) Vs Les petites bulles sont de la vapeur d'eau
- 13) La température de l'eau stagne quand elle se change en vapeur d'eau durant l'ébullition
- 14) Vs la température de l'eau augmente quand elle se change en vapeur d'eau durant l'ébullition

Une caractéristique saillante de la discussion collective concerne la gestion topogénétique des objets de la mésogénèse par Nathan. Celui-ci utilise une technique unique pour l'ensemble de la discussion (alors que les problèmes qui se posent à l'élève sont différents à chaque étape) : il s'agit du surplomb topogénétique plus ou moins « déguisé ». Nous l'avons déjà développé : la négociation du sens des objets procède par essai/erreur. Si l'objet amené par l'élève est idoine avec les savoirs visés, il est alors accepté. S'il est incompatible, il est rejeté sans justification. Les objets se succèdent ainsi dans la mésogénèse jusqu'à ce que le « bon » apparaisse et soit validé par Nathan. Pour rendre ce mécanisme moins flagrant, Nathan pose également des questions fermées ou triviales ou bien utilise les ressorts superficiels du contrat didactique. La chronogénèse est caractérisée par des validations abruptes d'objets dans le milieu, presque sans lien avec ce qu'ont construit les élèves dans les travaux de groupe.

Dans la suite, nous rendons intelligible le schéma d'action de l'enseignant en le mettant en regard avec celui des élèves.

Première étape : La température augmente puis stagne autour de 100°C

Nathan, fidèle à la technique du surplomb topogénétique « déguisé », valide rapidement un objet du milieu (« ça monte et ça bloque » introduit par Lilian), déjà proche de ce qu'il projette d'institutionnaliser (O8). Dans ce cas, il est intéressant de remarquer que ce geste n'opère pas de discontinuité majeure entre ce qu'ont produit les élèves dans les travaux de groupe et ce qui finit par être institutionnalisé puisque tous les groupes ont relevé, avec étonnement et/ou anxiété, le fait que la température cesse d'augmenter. Peut-être l'enseignant a-t-il remarqué ce fait, ce qui lui permet de passer rapidement, avec raison, sur cet aspect de l'expérience.

Deuxième étape : Avant 100°C, il y de petites bulles et après 100°C, de grosses bulles.

Puis, Nathan demande aux élèves de se prononcer sur l'évolution de la taille des bulles durant toute la durée de l'expérience. Mettons en tension le point de vue des élèves et celui de l'enseignant sur la question. Du point de vue des élèves :

- Soit ils se sont interdits de dépasser les injonctions de la fiche : ils ont peu ou pas regardé le comportement de l'eau (cas du groupe Ana, Mat, Max).
- Soit ils ont remarqué certaines caractéristiques du comportement des bulles mais sont dans l'impossibilité de s'en souvenir. En effet, puisque la fiche ne leur enjoint pas de rapporter des observations à l'écrit, ce serait vraiment dépasser les attentes perçues que de prendre l'initiative de les prendre en note. Ces effets de contrat expliquent qu'aucun groupe ne s'y soit risqué.
- Même dans le cas improbable où ils ont prêté une grande attention au développement des bulles (et s'en souviennent), l'expérience d'ébullition voit se succéder une variété de bulles tout au long du phénomène et sans évoluer de manière tout à fait linéaire, la taille des bulles ne manifeste pas pour autant de discontinuité nette.

Du point de vue de l'enseignant, la discontinuité entre deux types de bulles n'apparaît de façon évidente que parce qu'il a fait sien le modèle du palier de température et qu'il a revisité les faits de manière à ce qu'ils correspondent au modèle en tout point. Comme la philosophie des sciences le soutient, la maîtrise de la théorie permet d'observer des distinctions dans les faits empiriques impossibles à discerner sans son appui. Nathan est alors en mesure d'estimer que si les élèves pensent que la taille des bulles augmente petit à petit (O10), c'est qu'ils n'ont pas été assez attentifs à l'expérience d'ébullition : il s'agirait donc de parer aux manquements des élèves en leur désignant ce qu'il aurait été de leur responsabilité de « voir » pendant l'expérience.

Le décalage fondamental entre de ce que l'enseignant pense que l'expérience d'ébullition peut apporter aux élèves et ce qu'elle leur apporte réellement s'accroît donc dans la discussion collective. C'est ce malentendu qui éclaire le surplomb topogénétique dont fait preuve Nathan dans cette étape et qui s'achève avec l'institutionnalisation de l'objet O9.

Troisième étape : Les petites bulles sont de l'air et les grosses bulles de la vapeur d'eau

Nathan oriente la discussion sur la nature des petites bulles qui apparaissent avant 100°C, puis sur celles des grosses bulles qui apparaissent subitement à 100°C. Toujours dans une posture de surplomb topogénétique « déguisé », il sollicite plusieurs élèves mais les objets que ceux-ci introduisent dans le milieu (O12) ne le satisfont pas et il les écarte rapidement avant d'en solliciter d'autres. L'infécondité de cette technique le pousse finalement à injecter lui-même les objets pertinents (O11).

Nous avons déjà relevé qu'à partir de ce moment, la discussion se concentre sur l'interprétation des observables. Or, les observables brutes (petites bulles et grosses bulles) ne donnent aucune

indication sur la nature du gaz qui les forme. Par conséquent, le fait étonnant ici n'est pas vraiment qu'il se place en posture de surplomb mais plutôt qu'il prend la peine de déguiser son surplomb topogénétique (en faisant intervenir les élèves dans la discussion, quitte à rejeter les objets qu'ils introduisent dès qu'ils apparaissent dans le milieu) alors même que les savoirs visés ne pouvaient pas être inférés de l'expérience. Pourquoi alors faire intervenir autant les élèves dans la discussion alors qu'ils ne peuvent pas découvrir seuls que les petites bulles sont de l'air et les grosses bulles de la vapeur d'eau ? Ce comportement révèle un point de vue de l'enseignant sur l'activité des élèves en classe et se rapporte à son épistémologie pratique. C'est un aspect que nous réexaminerons sous l'angle comparatiste dans la discussion.

Quatrième étape : La température de l'eau stagne quand elle se change en vapeur d'eau durant l'ébullition

Nathan demande aux élèves de se positionner quant à l'évolution de la température de l'eau pendant sa vaporisation. Nous avons remarqué que bien que les élèves aient techniquement à disposition tous les éléments pour développer le raisonnement (les objets institutionnalisés lors des étapes précédentes), certains d'entre eux promeuvent une augmentation de la température pendant l'ébullition (O14). Il est vrai que les élèves ont développé des rapports aux objets triviaux, inutiles ou contre-productifs pendant les phases de réalisation de l'expérience et de retour sur les hypothèses : la discontinuité entre leurs rapports aux objets et ceux institutionnalisés par Nathan s'est creusée tout au long de la discussion. À cette étape, ils sont censés revisiter seuls l'expérience d'ébullition et son interprétation, à l'aune des objets fraîchement institutionnalisés par Nathan (nature des bulles, etc.). Il s'avère que le reste à charge des élèves afin d'être capables de s'emparer et réinvestir des objets incompatibles avec leurs façons précédentes de penser est trop important pour certains, qui continuent de recourir à leurs références premières pour traiter de l'évolution de la température pendant la vaporisation. On comprend alors que si l'enseignant tient à avancer dans la construction des savoirs, il soit contraint de se placer en posture de surplomb afin d'institutionnaliser le modèle du palier de température (O13).

Les motifs et effets de l'utilisation du surplomb par Nathan sont différents dans les quatre étapes :

- Dans la première, le surplomb topogénétique permet d'institutionnaliser rapidement un fait déjà reconnu par la classe entière.
- Dans la deuxième, le surplomb découle d'un décalage à propos de ce que Nathan pense que l'expérience d'ébullition peut impulser comme nouveaux rapports aux objets chez les élèves et ce qu'elle leur permet effectivement de transformer.
- Dans la troisième, le surplomb topogénétique permet d'introduire des savoirs que les élèves n'auraient pas pu induire seuls de l'expérience.
- Dans la quatrième, la rupture est consommée entre le point de vue des élèves et celui de Nathan : le décalage entre les objets institutionnalisés par l'enseignant et ceux introduits par les élèves est tel que les élèves ne parviennent plus à suivre la logique des objets que

l'enseignant injecte dans le milieu. Nathan se voit obligé d'imposer le modèle du palier de température.

Quel degré de continuité entre les rapports aux objets construits par les élèves et ceux visés par l'enseignant ?

Lors de l'expérience d'ébullition, les élèves sont davantage préoccupés par la solidité et l'efficacité du montage expérimental que par la formulation de constats concernant le comportement de l'eau en rapport avec la température relevée. Quelques observations éparses se construisent toutefois : des bulles sont observées sur un intervalle allant de 50 à 77°C, de la buée et de la « fumée » sont repérées à 50°C, etc. Quant à l'ébullition, les groupes d'élèves la repèrent sur un large intervalle de température allant de 38°C à 90°C. Aucun ne l'associe à la température de 100°C. La simultanéité de la stagnation de la température et de l'ébullition (ou d'un changement d'état de l'eau) n'est pas exprimée.

Lors de la discussion collective, Nathan décrit d'une manière tout à fait différente les observables : en effet, il installe dans le milieu les éléments d'observation qui frayent la voie à l'établissement du modèle du palier de température (les petites bulles avant 100°C et les grosses bulles à 100°C définissant l'ébullition). Puis, il assume seul l'interprétation des nouveaux faits décrits, à travers l'introduction de ce modèle : la stagnation de la température se déroule conjointement au changement d'état liquide-vapeur que subit l'eau. Par conséquent, les élèves ont un rôle négligeable dans la construction des savoirs : ils n'apportent ni élément de modélisation ni élément d'observation pertinents ni lien entre les deux aspects. Ils sont réduits à être spectateurs des savoirs que l'enseignant déroule devant eux et ne participent jamais vraiment à la dynamique de leur construction. Il existe une discontinuité importante entre les rapports aux objets construits par les élèves lors de l'expérience, de la validation/invalidation des « hypothèses » et de la discussion collective et les rapports aux objets institutionnalisés par l'enseignant.

Quels schémas d'action l'enseignant développe-t-il au cours de la négociation des rapports aux objets construits par les élèves pour atteindre ce degré de continuité ?

N1) Nathan sollicite constamment les élèves pour donner leur avis et fait en sorte que la construction des savoirs semble se fonder sur les éléments du milieu apportés par les élèves, au risque de les soumettre à un contrat didactique de type « jeu de devinette » dans lequel les apports des élèves sont successivement rejetés jusqu'à ce que l'objet conforme à ses visées apparaisse. Plusieurs productions d'élève sont qualifiées d'« hypothèses » : les anticipations de l'évolution du comportement et de la température de l'eau au fur et à mesure qu'elle est chauffée, sa valeur maximale atteinte, l'allure de son graphe en fonction du temps.

N2) Il estime que l'observation brute de certains événements, mis en place sans contextualisation aucune dans le milieu, est assez robuste à elle-seule pour faire évoluer dans un sens favorable les rapports aux objets développés par les élèves. Ainsi, lors de l'expérience d'ébullition, la consigne qu'il donne aux élèves est très évasive sur ce qu'il convient de constater du comportement de l'eau, comme si le côtoiement direct de l'expérience était suffisant pour provoquer la reconnaissance des éléments d'observation pertinents.

N3) Il associe à chaque tâche proposée aux élèves une liste de quelques « compétences » qui sont censées être activées durant la réalisation de cette tâche. Ces « compétences », extraites de la grille de compétences que Nathan a conçue (cf. Figure 57, p. 334) se présentent comme des éléments de

l'activité scientifique au sens large. Elles constituent parfois les seules contraintes données aux élèves pour mener à bien la tâche qui leur est dévolue, tout en se situant parfois en déphasage avec les enjeux de savoirs qu'elle vise. Ainsi, dans le cas de l'ébullition, les compétences présentes sur la fiche d'étude expérimentale ignorent le comportement de l'eau en rapport avec sa température (cf. Figure 53) : « suivre un protocole » (F4) ; « utilisation correcte du thermomètre » (F5) ; « tracer un graphique » (C7) ; « respect des consignes de sécurité » (S1) ; et « travailler en équipe avec méthode et dans le calme » (S3).

Compétences travaillées :	
- F4 suivre un protocole	- S1 respect des consignes de sécurité
- F5 utilisation correcte du thermomètre	- S3 travailler en équipe avec méthode et dans le calme
- C7 tracer un graphique	

Figure 53 : En-tête de la fiche d'étude expérimentale de l'ébullition

La conjonction de ces schémas d'action permet d'éclairer les conclusions formulées à propos des degrés de continuité :

- Il existe un décalage entre ce que l'enseignant pense que l'expérience d'ébullition peut apporter aux élèves (N2) et ce qu'elle leur apporte réellement. Autrement dit, Nathan surestime l'impact potentiel de l'expérience sur les modifications des rapports aux objets des élèves : les élèves retirent très peu d'éléments sur lequel peut s'appuyer Nathan pour construire le savoir dans la classe.
- Cet effet est encore aggravé par le contexte évaluatif qui ne se fonde que sur les compétences précédemment citées (N3). La nature de ces compétences encourage les élèves à interpréter la situation dans laquelle ils sont placés comme une évaluation de la rigueur avec laquelle ils se chargent des aspects pratiques de l'expérience. Les quelques constatations isolées qu'ils mènent s'éparpillent et ne sont pas notées ou mises en mémoire.

Lors de la discussion collective, ils ne sont donc pas en mesure de s'impliquer de manière productive dans la mise en commun des observations et dans la construction des interprétations des observations. Dans cette situation, la seule solution pour sembler encore se fonder sur les éléments du milieu apportés par les élèves (N1) est de déguiser une position de surplomb trop marqué, en faisant participer les élèves a minima, pour répondre à des questions fermées ou dichotomiques. Au final, l'ensemble des schémas d'action (N1, N2, N3) produit une discontinuité entre les objets construits par les élèves lors de l'expérience et ceux institutionnalisés par l'enseignant et retarde l'accès des élèves à la logique des objets que l'enseignant injecte dans le milieu.

Chapitre 11 **DISCUSSION DES RÉSULTATS**

La première strate de l'enquête nous a permis de caractériser les degrés de continuité entre les rapports aux objets construits par les élèves et les rapports aux objets visés par l'enseignant, puis de rapporter ces degrés de continuité aux schémas d'action de l'enseignant, et ce, pour chacun des contextes étudiés (Suisse romande primaire, Suisse romande secondaire, France primaire, France secondaire).

Dans le présent chapitre, nous divisons la discussion en deux parties :

- Dans la première partie, nous nous intéressons aux formes d'épistémologie pratique des enseignants, c'est-à-dire que nous explorons comment chacun des enseignants intègre et reconfigure les injonctions institutionnelles pour organiser sa pratique de classe. Pour ce faire, nous procédons à une modélisation ascendante des principes qui, selon nous, structurent les schémas d'action des enseignants. Ces principes structurants sont construits à partir d'une analyse comparatiste des schémas d'action qui ont été inférés depuis les pratiques dans les quatre contextes : c'est l'analyse comparatiste qui permet de décontextualiser des schémas d'action embarqués dans une action conjointe particulière pour modéliser des principes structurants plus généraux. Cependant, bien que les principes structurants aient été dégagés de la comparaison des quatre cas, la logique expositive impose de les révéler au fur et à mesure de l'examen de chacun d'entre eux. Nous nous efforçons ensuite de mettre en résonance, lorsque c'est possible, les principes structurants avec les caractéristiques des textes prescriptifs correspondants. Enfin, nous discutons les conséquences de ces principes sur les conditions d'accès aux savoirs du point de vue des élèves.
- Dans la deuxième partie, nous formalisons des phénomènes dont nous estimons qu'ils comportent une portée générique, en faisant également fonctionner une perspective comparatiste. Ces phénomènes concernent les conditions générales d'une continuité entre rapports aux objets construits par les élèves et rapports aux objets visés par l'enseignant, conditions qui sont mises en relation avec le caractère contraint (ou non) des situations que l'enseignant propose à ses élèves.

11.1 Les formes d'épistémologie pratique dans les classes observées

11.1.1 Le cas d'Amélie (primaire, Genève)

11.1.1.1 Synthèse de l'analyse empirique de la classe d'Amélie (cf. 7.5, p. 184)

Dans cette partie, nous reportons la conclusion de l'étude empirique de la classe d'Amélie, telle qu'elle a été rédigée dans la section 7.5, p. 184. Nous procéderons de la même façon pour les autres classes.

Quel degré de continuité entre les rapports aux objets construits par les élèves et ceux visés par l'enseignante ?

Dès le début de la séquence, les élèves d'Amélie ont l'occasion d'exprimer leurs premières idées par rapport aux objets « vapeur d'eau », « état gazeux de l'eau », « nuage », « brouillard », etc., parmi lesquelles :

- La vapeur d'eau correspond aux volutes blanches de brume/brouillard/nuages ;
- L'état gazeux de l'eau correspond à de la fumée, etc.

Les gestes d'Amélie maintiennent ensuite une ambiguïté persistante quant à la validité de ces premières idées, ambiguïté qui se prolonge jusqu'au milieu de la séquence. Les élèves ne peuvent se positionner seuls sur la pertinence des rapports initiaux aux objets « vapeur d'eau », « état gazeux de l'eau », « nuage », « brouillard », etc., qu'ils ont eux-mêmes déployés. Ils continuent alors à les utiliser pour donner du sens et se repérer dans les tâches suivantes. Du point de vue du chercheur, les gestes d'Amélie se focalisent sur les caractéristiques superficielles et contingentes des propositions des élèves. Ces gestes masquent ainsi la discontinuité entre les rapports aux objets que les élèves ont construits et ceux qu'elle sait être les objectifs en termes de savoir.

Puis, lors des expériences d'ébullition et de condensation, Amélie introduit brusquement une succession de nouveaux rapports à ces objets, qui sont discontinus avec les premières idées des élèves :

- La vapeur d'eau est invisible ;
- La brume, la buée, les nuages sont de l'eau sous forme liquide, etc.

L'écart avec les premières idées des élèves est tel que la plupart d'entre eux ne parvient pas à rendre fonctionnels les nouveaux rapports aux objets « vapeur d'eau », « état gazeux de l'eau », « nuage », « brouillard », etc. apportés par Amélie. Les élèves continuent donc de mobiliser leurs rapports initiaux à ces objets lors de la tâche finale de récapitulation des savoirs.

En résumé, l'étude de la dynamique de construction des savoirs révèle une continuité « de surface » entre les rapports aux objets construits par les élèves et ceux visés par l'enseignante jusqu'au milieu de la séquence, suivie d'une discontinuité nette qui ne parvient pas à se résorber et qui dure jusqu'à la fin de la séquence.

Quels schémas d'action l'enseignante développe-t-elle au cours de la négociation des rapports aux objets avec les élèves pour atteindre ce degré de continuité ?

A1) Amélie sollicite constamment les élèves pour donner leur avis et fait en sorte que la construction des savoirs semble se fonder sur les éléments du milieu apportés par les élèves, au risque d'une déformation de la signification de ces éléments. Plusieurs productions d'élèves sont qualifiées d'« hypothèses » : les idées d'expériences des élèves pour transformer de l'eau liquide en eau sous forme de gaz ; les anticipations des élèves à propos de la température de ce changement d'état ; lorsque certains élèves soutiennent que la vapeur est visible et que d'autres défendent le contraire, il s'agit de « deux hypothèses qui s'affrontent », selon Amélie.

A2) Elle introduit et institutionnalise les modélisations des phénomènes d'évaporation et condensation à la fin de la séquence. Ces modélisations, qui permettent une compréhension des phénomènes observés ne sont pas (re)mis à l'épreuve, car la séquence est clôturée peu après.

A3) Elle confronte les élèves à l'observation directe de certains phénomènes physiques, qu'elle met en place sans contextualisation préalable dans le milieu : par exemple, l'analyse des vingt photographies de paysages naturels soumis à des variations de conditions météorologiques est censée permettre aux élèves de construire les catégories [liquide, solide, gaz].

La conjonction de ces schémas d'action permet d'éclairer les conclusions à propos des degrés de continuité :

- Amélie fait d'abord en sorte que la construction des savoirs se fonde sur les éléments du milieu apportés par les élèves (A1), mais comme elle n'apporte d'emblée aucun élément de modélisation (A2) et que l'observation empirique n'est pas suffisante (A3), les élèves ne disposent d'aucune ressource pour développer de nouveaux rapports aux objets sur lesquels elle pourrait s'appuyer. Amélie doit alors surinterpréter les apports des élèves dans le milieu afin qu'ils s'alignent avec les enjeux de savoirs visé (effet Jourdain). Aussi, il ne s'agit que d'une « continuité de surface ».
- Plus la séquence avance, plus cette position est difficile à tenir. Puisque le potentiel d'exploitabilité des propositions des élèves est toujours aussi faible (A1, A2, A3), elle finit par basculer dans une position de surplomb topogénétique pour amener dans le milieu l'ensemble des éléments de modélisation visés, puis clôt la séquence tout de suite après (A2), sans avoir résorbé la discontinuité générée par leur introduction.

11.1.1.2 Les formes d'épistémologie pratique dans la classe d'Amélie

Nous nous intéressons maintenant à la façon dont Amélie intègre et reconfigure les injonctions institutionnelles pour organiser ses pratiques de classe. Pour ce faire, nous identifions certains principes structurants qui émergent depuis les schémas d'action d'Amélie, à partir d'une analyse comparatiste avec les autres contextes étudiés. Puis, nous nous efforçons ensuite de mettre en résonance, lorsque c'est possible, les principes structurants avec les caractéristiques des textes prescriptifs auxquels elle est soumise (PER, moyens d'enseignement).

Les principes structurants au cœur des schémas d'action d'Amélie (A1, A2, A3)

Nous construisons les principes structurants à partir d'une analyse des schémas d'action qui ont été inférés depuis les pratiques de classe. La structure du tableau qui décrit un principe structurant est la suivante :

- Les caractéristiques du principe structurant, décrites en italique, reprennent des termes qui pourraient être utilisés par les enseignants ou les formateurs.
- Certaines justifications didactiques et/ou pédagogiques qu'il est possible d'associer au principe structurant sont ensuite développées.
- Certains des fondements théoriques qu'il est possible de relier aux justifications didactiques et/ou pédagogiques sont enfin présentées.

Le schéma d'action A1 peut être modélisé par le principe structurant 1 suivant (PS1):

Principe Structurant 1 : les « idées premières »²³ des élèves comme point de départ de l'enseignement

Il est important de recenser et valoriser les « idées » que les élèves ont vis-à-vis des thématiques qui doivent être étudiées, et ceci préalablement à tout geste d'enseignement à leur propos. Les « idées premières » des élèves constituent le point de départ sur lequel fonder la construction des savoirs dans la suite de la séquence. De façon générale, les élèves doivent s'exprimer à tous les stades de construction des savoirs.

Le PS1 se pose en rupture avec un mode d'exposé transmissif des savoirs.

Justifications didactiques / pédagogiques possibles :

- la prise en compte des « idées premières » permet d'engager les élèves dans la tâche et de maintenir une posture active de leur part ;
- faire participer les élèves à la construction des savoirs leur permet de mieux les comprendre / assimiler ;
- mettre à distance les idées fausses, en les objectivant dans un moment dédié, permet de mieux s'en séparer dans la suite ;
- autres ?

Fondements théoriques possibles :

Le principe structurant 1 peut être considéré comme le résultat de l'agrégation :

- d'un certain constructivisme pédagogique, qui met en avant la construction active des connaissances par l'apprenant (cf. « les méthodes actives » abordées en section 3.1.3);
- de certains travaux de didactique des sciences portant sur la théorie du changement conceptuel qui ont développé un modèle de dépassement des « conceptions initiales » à travers la mise en scène d'anomalies (cf. 2.1.2.3) ;
- de certains autres travaux de didactique des sciences qui ont repris cette idée de « déséquilibre des conceptions initiales » en la greffant sur un modèle hypothético-déductif de reconstruction des savoirs en classe (cf. 2.1.2.3).

²³ Dans notre langage, les « idées premières » constituent les rapports initiaux aux objets du milieu, rapports dérivés en grande partie des usages familiers de ces objets (cf. 2.32.2.4).

Les schémas d'action A2 et A3 peuvent être modélisés par le principe structurant 2 suivant (PS2) :

Principe Structurant 2 : Le modèle à apprendre comme généralisation de la conclusion de l'observation/expérience

La construction des éléments de modélisation procède par généralisation à partir des données de l'expérience auxquelles les élèves sont confrontés. Les conclusions de l'observation révèlent le modèle à apprendre.

Les modèles constituent les résultats auxquels on parvient à la fin de l'activité/de la séquence. Ils constituent donc l'aboutissement de l'ensemble du travail accompli précédemment. Une fois les modélisations posées, il ne reste plus rien à apprendre.

Similairement au PS1, le PS2 se pose en rupture avec un mode d'exposé transmissif des savoirs.

Justifications didactiques / pédagogiques possibles :

- l'expérience concrète initie une dynamique active de conceptualisation et d'abstraction de la part des élèves ;
- à travers la confrontation avec des phénomènes ou des expériences choisis, les élèves sont en mesure d'accueillir logiquement le modèle visé, voire de participer eux-mêmes à sa construction ;
- l'observation / expérimentation permet aux élèves d'abandonner leurs idées première ;
- la démarche ascendante des données empiriques vers les modélisations est une spécificité de l'activité scientifique de référence qu'il faut conserver dans la classe ;
- autres ?

Fondements théoriques possibles :

Le principe structurant 2 peut être considéré comme le résultat de l'agrégation :

- d'un certain constructivisme pédagogique, qui met en avant la construction active des connaissances par l'apprenant (cf. 3.1.3) ;
- d'un certain constructivisme épistémologique de type inductiviste, selon lequel les théories (et modèles) scientifiques sont des généralisations univoques de données d'observation ou d'expérience (cf. 2.1.2.1) ;
- de certains travaux de didactique des sciences portant sur la théorie du changement conceptuel qui ont développé un modèle de dépassement des « conceptions initiales » à travers la confrontation avec des expériences contre-intuitives (cf. 2.1.2.3).

Les principes structurants d'Amélie (PS1 et PS2) vis-à-vis des textes prescriptifs

Nous mettons en résonance les principes structurants inférés des schémas d'action d'Amélie avec les caractéristiques des textes prescriptifs auxquels l'enseignante est soumise (PER, moyens d'enseignement).

Au primaire, le plan d'études romand expose une liste d'éléments d'une démarche scientifique mais il ne les envisage pas comme un processus temporalisé de reconstruction des connaissances dans la classe et ne détaille pas une répartition des responsabilités les concernant. Dans la classe d'Amélie, la démarche scientifique n'est effectivement pas mise en œuvre comme une succession globale d'étapes qui mènerait à des nouveaux savoirs. En fait, il existe peu de traces des recommandations du PER dans son enseignement.

La seule exception notable réside dans l'emploi du terme « hypothèse » qu'Amélie utilise à plusieurs reprises pour qualifier certaines productions d'élèves et qui fait écho à la « formulation de quelques questions et hypothèses au sujet d'une problématique » (PER MSN, cycle 2, 2011, p. 32).

Il est intéressant de développer quelle signification le terme « hypothèse » prend dans la classe d'Amélie, en rapport avec le principe structurant 1 (les « idées premières » des élèves comme point de départ de l'enseignement). Nous avons déjà remarqué que le terme « hypothèse » correspond aux idées des élèves vis-à-vis de la visibilité de l'eau sous forme de gaz ou aux idées d'expérience pour changer l'eau liquide en eau sous forme de gaz. Puisqu'Amélie les fait émerger sans geste d'enseignement préalable, les « hypothèses » reflètent les rapports initiaux que les élèves entretiennent vis-à-vis des objets « vapeur d'eau » et « eau liquide ». Or, nous rappelons que les hypothèses formulées au sein des communautés scientifiques présentent plusieurs caractéristiques : ce sont des modèles interprétatifs provisoires qui doivent être soumis au contrôle de l'expérience, d'une part ; elles s'appuient sur un arrière-plan théorique et méthodologique accepté par une communauté donnée, d'autre part (cf. 2.1.2.2). Comme les « hypothèses » dans la classe d'Amélie sont développées à partir de références externes à la classe qui ne sont d'ailleurs pas objectivées, d'une part et ne se fondent pas sur un réseau théorique partagé, d'autre part, elles s'éloignent considérablement de leur signification en usage dans les communautés scientifiques de référence.

En résumé, le terme « hypothèse » revêt peu de caractéristiques qui renvoient à son usage épistémologique dans le questionnement scientifique et s'assimile plutôt aux « idées premières », aux rapports initiaux des élèves face aux objets de la situation. Cette conception se retrouve d'ailleurs dans le discours d'Amélie lors de l'entretien post observation, celle-ci revendiquant un milieu de départ très ouvert qui laisse la place à l'expression de la pluralité des idées des élèves :

« je vais d'abord laisser très ouvert pour que petit à petit ils se sentent à l'aise de proposer plein de choses/ des fois tu peux être très surpris de certains raisonnements en positif mais en négatif aussi/(...) là quand ils osent/ s'ils sont pas en train de se moquer les uns les autres de tout ce qu'ils peuvent dire/ t'as vu/ c'est assez respectueux/à force de dire qu'on est dans *des hypothèses*

y a rien d'absurde et puis voilà/(...) je pars pas d'un principe jugeant de la bonne et de la mauvaise réponse/la bonne réponse on l'aura après mais pour l'instant on essaye d'imaginer » (entretien post observation, Amélie, min 11-12)

Le principe structurant 1 éclaire la configuration particulière que prend le terme « hypothèse » dans la pratique d'Amélie. Faire émettre des « hypothèses » aux élèves devient un moyen simple de capter leurs « idées premières » (en accord avec le principe structurant 1) tout en suivant, en apparence, une injonction du plan d'études relative à la démarche scientifique. Cependant, cette hybridation de deux déterminants de l'action ne permet pas de conserver le sens épistémologique du terme « hypothèse ».

Mis à part l'emploi de ce terme, les principes structurants d'Amélie (PS1, PS2) ne peuvent pas être mis en filiation directe avec d'autres caractéristiques du PER. Ils témoignent des formes de multi-assujettissements accumulés dans la biographie professionnelle d'Amélie, que nous ne pouvons pas nécessairement identifier dans les textes institutionnels actuels, auxquels nous avons accès.

11.1.1.3 Conclusion

L'enseignement d'Amélie renvoie à peu de prescriptions présentes dans le PER, peut-être parce qu'au primaire, celui-ci ne contient pas d'éléments suffisamment structurants pour donner une ossature à une séquence d'enseignement. En revanche, il est possible d'identifier au moins deux principes structurants dans la pratique d'Amélie (PS1 et PS2), qui agrègent des discours relevant de différents niveaux de détermination : pédagogique, didactique, scientifique et épistémologique/philosophique.

À ce stade, nous notons que ces principes (1 et 2) qui structurent les schémas d'action (A1, A2, et A3) dans la pratique d'Amélie s'avèrent peu favorables à la construction d'une continuité entre les rapports que les élèves établissent aux objets du milieu et ceux institutionnalisés par Amélie.

11.1.2 Le cas de Louise (primaire, France)

11.1.2.1 Synthèse de l'analyse empirique de la classe de Louise (cf. 8.5, p. 219)

Quel degré de continuité entre les rapports aux objets construits par les élèves et ceux visés par l'enseignante ?

Au début de la séquence, les élèves ont l'occasion d'exprimer leurs premières idées par rapport à la baisse du niveau de l'eau dans l'éprouvette qui vient d'être constatée :

- L'eau a été absorbée par le plastique de l'éprouvette
- Elle est partie ailleurs (ciel, air, nuages), etc.

Le document de référence, en introduisant dans le milieu les modélisations scientifiques relatives à l'évaporation et la condensation parmi lesquelles figurent certains objets cruciaux (dont l'existence d'une forme d'eau invisible appelée vapeur) amène une discontinuité majeure

entre les rapports aux objets construits préalablement par les élèves et ceux visés par l'enseignante. Les deux tâches suivantes s'attèlent à résorber cette discontinuité :

- En revisitant la disparition de l'eau liquide avec un regard outillé, les élèves parviennent à y discerner la création d'une nouvelle forme d'eau et à la conceptualiser en la reliant à une autre forme déjà reconnue (la glace).
- Certains élèves sont en mesure de catégoriser la buée et le brouillard sous l'état liquide en explorant les implications des modélisations introduites. Deux critères leur permettent de faire évoluer leur représentation de ces phénomènes : la présence de petites gouttes et le fait d'être mouillé au contact de la buée.

À travers les tâches succédant à l'introduction du document de référence, certains élèves sont capables de rendre fonctionnels les nouveaux rapports aux objets « eau liquide », « vapeur d'eau », « évaporation » et « condensation » que le document fournit.

En résumé, la dynamique de construction des savoirs laisse apparaître une discontinuité majeure lors de l'introduction du document de référence qui apporte les modélisations de l'évaporation et de la condensation : d'ailleurs, les rapports à l'objet « disparition de l'eau liquide dans l'éprouvette » ne seront plus évoqués dans la suite. Puis, cette discontinuité est progressivement résorbée à travers certains schémas d'action mis en œuvre par Louise que nous détaillons ci-après.

Quels schémas d'action l'enseignante développe-t-elle au cours de la négociation des rapports aux objets construits par les élèves pour atteindre ce degré de continuité ?

L1) Louise encourage les élèves à s'exprimer tout au long de la séquence. En particulier, les rapports initiaux que les élèves entretiennent vis-à-vis de certains objets de la thématique abordée (par exemple, l'objet « disparition de l'eau liquide ») en constituent le point de départ. Plusieurs productions d'élèves sont qualifiées d'« hypothèses » : les premières tentatives de solution à apporter au défi GrandSoif, les anticipations des élèves sur le comportement de l'eau laissée à l'air libre et les explications au sujet de la disparition de l'eau liquide, une fois celle-ci constatée.

L2) Elle introduit les modélisations des phénomènes d'évaporation et de condensation tôt au sein de la séquence et déploie des gestes diversifiés pour que les élèves s'en emparent :

- L2a) Elle organise un ralentissement chronogénétique dès leur introduction, en proposant des tâches de mise à l'épreuve des modélisations introduites : un réexamen de la disparition de l'eau liquide et une réévaluation des phénomènes familiers de buée et de brouillard.
- L2b) Elle montre une palette diversifiée de techniques topogénétiques et mésogénétiques qui permettent de négocier les apports des élèves dans le milieu. Par exemple, elle organise la contradiction entre plusieurs objets du milieu, dont certains explorent les ramifications des modélisations introduites et d'autres mobilisent des points de vue quotidiens.

- L2c) Elle met en relief les caractéristiques des modélisations imposées qui sont compatibles avec ce que les élèves savent probablement déjà : par exemple, les gouttes caractérisent l'état liquide ; le fait d'être mouillé (et donc, couvert de gouttes) en passant le doigt contre la buée permet de la situer sous l'état liquide ; le fait que la glace est une forme d'eau soutient le fait que la vapeur en est une autre, etc.

La conjonction de ces schémas d'action permet d'éclairer les conclusions formulées à propos des degrés de continuité :

- Louise recueille et diffuse les rapports initiaux à l'objet « disparition de l'eau liquide » (L1) mais aucun de ces rapports ne mentionne un changement de forme ou d'état de l'eau. Dans ce cadre, l'introduction précoce des modélisations qui se fondent sur l'existence d'une forme d'eau invisible (L2) ne peut que créer une discontinuité importante avec les idées premières des élèves.
- Puis, l'introduction du document de référence (L2) fournit des ressources aux élèves et autorise une diversification des gestes de négociation de l'enseignante vis-à-vis des apports des élèves dans le milieu (L2a, L2b, L2c). Certains élèves sont alors en mesure de construire des liens entre la baisse de niveau de l'eau liquide, le brouillard, la buée, d'une part et les concepts théoriques de vapeur d'eau, d'évaporation et de condensation, d'autre part, ce qui explique le comblement constaté de la discontinuité.

11.1.2.2 Les formes d'épistémologie pratique dans la classe de Louise

Nous nous intéressons maintenant à la façon dont Louise intègre et reconfigure les injonctions institutionnelles pour structurer ses pratiques de classe. Pour ce faire, nous identifions certains principes structurants qui émergent depuis les schémas d'action de Louise. Puis, nous nous efforçons ensuite de mettre en résonance les principes structurants avec les caractéristiques des textes prescriptifs auxquels elle est soumise (programmes, documents d'accompagnement, séquence GrandSoif).

Les principes structurants au cœur des schémas d'action de Louise (L1, L2, L2a, L2b, L2c)

Le schéma d'action L1, repéré depuis les pratiques de classe de Louise, est aligné avec les éléments du principe structurant PS1, déjà développé à partir des schémas d'action d'Amélie. Selon le PS1, les « idées premières » des élèves constituent le point de départ sur lequel fonder la construction des savoirs dans la suite de la séquence. Cette interprétation se consolide en tenant compte de l'investissement particulier que Louise affirme accorder vis-à-vis des rapports initiaux que les élèves construisent face aux objets du milieu :

« moi ce que je me suis dit/ c'est que je prenais toutes leurs propositions et qu'après on allait recentrer pour voir ce qui nous intéressait/ou pas/(...) c'est ce que je fais en général que ce soit en français/ et c'est ce que j'essaye de faire comprendre aux stagiaires/parce que si on prend pas en compte leurs idées au départ/ pour moi c'est transversal/ que ce soit en grammaire/que ce soit/ si tu ne leur fais pas comprendre soit par le débat soit par le document soit par la théorie apporté que ça [les idées des élèves] c'est peut-être pas faux

mais que ça nous sert pas/ ils vont rester bloqués sur leurs idées » (entretien ante observation, Louise, min 29-30)

Le discours de Louise reprend d'ailleurs certaines justifications pédagogiques du PS1 : recueillir les idées des élèves permet de les engager dans un processus de distanciation et de prise de recul vis-à-vis d'elles, qui permet ensuite une meilleure appréhension des savoirs visés.

Les schémas d'action L2, L2a, L2b et L2c peuvent être modélisés par le principe structurant 3 suivant (PS3) :

Principe Structurant 3 : Le modèle comme moyen opératoire d'élucider les évènements du monde naturel

Les modèles peuvent être (partiellement) fournis aux élèves dès le début et peuvent fonctionner ensuite comme des outils pour comprendre, expliquer et prédire des phénomènes naturels choisis par l'enseignant.

Il ne s'agit donc pas de reconstruire ou de faire reconstruire un modèle aux élèves : il s'agit de leur donner les moyens de s'approprier un modèle (partiellement) fourni afin qu'ils soient en mesure d'élucider des phénomènes choisis du monde naturel.

Justifications didactiques / pédagogiques possibles :

- les élèves ne sont pas en mesure de reconstruire les modèles que les humains ont progressivement élaborés, mais ils doivent se les approprier ;
- la modélisation, c'est-à-dire la confrontation entre constructions théoriques et faits expérimentaux est une spécificité de l'activité scientifique de référence qu'il faut conserver dans la classe ;
- autres ?

Fondements théoriques possibles :

Le principe structurant 3 peut être considéré comme le résultat de l'agrégation :

- d'un certain constructivisme pédagogique, qui met en avant la construction active des connaissances par l'apprenant (cf. 3.1.3) ;
- de certains travaux de didactique des sciences portant sur la théorie des deux mondes, d'une part et sur la conception de séquences d'enseignement « cycliques », d'autre part. Ces séquences font jouer un rôle important à une base axiomatique d'éléments de modélisation fournie aux élèves dès le début, base axiomatique qui constitue l'outil pour penser toutes les situations physiques qui leur sont présentées par la suite (cf. 2.2.3).

Les principes structurants de Louise (PS1 et PS3) vis-à-vis des textes prescriptifs

Nous mettons en résonance les principes structurants inférés des schémas d'action de Louise avec les caractéristiques des textes prescriptifs auxquels l'enseignante est soumise (programmes, documents d'accompagnement, séquence GrandSoif).

Au niveau du programme, nous rappelons qu'au primaire, celui-ci propose une mise en place de la démarche d'investigation qui suit un déroulement en cinq étapes consécutives :

- « Le choix de la situation de départ
- La formulation du questionnement des élèves
- L'élaboration des hypothèses et la conception de l'investigation
- L'investigation conduite par les élèves
- L'acquisition et la structuration des connaissances » (MEN 2002, p. 8-9)

Quant à la séquence GrandSoif, séquence réalisée par les enseignants-ressources en sciences de la Haute-Garonne, la section analysée dans la classe de Louise correspond à la partie suivante du document-maître (cf. Figure 54) :

Séance	Objectifs	Matériel	Déroulement, consigne, activité des élèves, organisation de la classe...
<p>2</p> <p>Qu'est devenue l'eau qui n'est plus dans le verre ?</p> <p>(Qu'est-ce que l'évaporation et la vapeur d'eau ?)</p>	<p>Repérer les conditions d'évaporation.</p> <p>Comprendre que l'évaporation est un changement d'état de l'eau.</p> <p>Comprendre la vapeur d'eau est un gaz invisible.</p>		<p><u>Collectivement</u> : faire observer la baisse du niveau d'eau dans le verre (ou la diminution de la masse ou du volume).</p> <p>Présenter l'objectif de la séquence : répondre à la question « Qu'est devenue l'eau qui n'est plus dans le verre ? »</p> <p><u>Individuellement</u> : faire écrire les hypothèses (Annexe 2 : fiche démarche)</p> <p><u>Collectivement</u> : mettre en commun les hypothèses et animer les échanges.</p> <p>Amener les élèves à :</p> <ul style="list-style-type: none"> - choisir la méthode d'investigation adaptée : la documentation, <p><u>Individuellement</u> : proposer de :</p> <ul style="list-style-type: none"> - lire un texte documentaire « L'évaporation et la vapeur d'eau » (Annexe 3 : textes documentaires), - écrire la conclusion (ma réponse à la question) (Annexe 2 : fiche démarche), <p><u>Collectivement</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> - amener à la production de la conclusion de la classe et des définitions de l'évaporation et de la vapeur d'eau, - faire compléter le lexique et lire la trace écrite (Annexe 4, page 1).

Figure 54 : Extrait du document-maître de la séquence GrandSoif

À première vue, le canevas de la démarche d'investigation est repris intégralement dans la structuration de la séquence GrandSoif. Cette mise en correspondance est résumée dans le tableau suivant :

Programme France/école primaire (MEN, 2002)	Document-maitre de la séquence GrandSoif
Le choix de la situation de départ	Faire observer la baisse du niveau d'eau dans le verre
La formulation du questionnement des élèves	Répondre à la question : qu'est devenue l'eau qui n'est plus dans le verre ?
L'élaboration des hypothèses et la conception de l'investigation	Faire écrire les hypothèses et les mettre en commun
L'investigation conduite par les élèves	Choisir la méthode d'investigation adaptée : la documentation Et lire un texte documentaire : « l'évaporation et la vapeur d'eau »
L'acquisition et la structuration des connaissances	Amener à la production de la conclusion de la classe et des définitions de l'évaporation et de la vapeur d'eau

Tableau 17 : Mise en correspondance du programme français et du document-maître de la séquence GrandSoif

Pourtant, l'analogie structurelle entre programme et séquence GrandSoif n'est qu'apparente : il apparaît de nombreuses divergences, cruciales vis-à-vis des situations vécues par les élèves. Sans rentrer dans les détails, relevons-en une : la notion d'investigation ne prend pas la même signification dans la séquence GrandSoif, d'une part et dans les programmes, d'autre part. Selon les programmes de l'école primaire (MEN, 2002), les élèves « conduisent des investigations réfléchies en mettant en œuvre des démarches concrètes d'expérimentation, complétées le cas échéant par une recherche documentaire » (p. 9). Autrement dit, les expérimentations constituent le cœur de l'investigation. Le texte documentaire n'est pas censé les remplacer, mais uniquement leur servir d'appui si besoin. Or, la séquence GrandSoif accorde un rôle primordial à l'introduction du document de référence qui permet, à lui seul, d'établir une « conclusion » sur l'eau liquide disparue. Du côté de la situation vécue par les élèves, l'exposition à des expérimentations, d'une part ou à un texte documentaire, d'autre part n'est pas de même nature. Ces deux ressources ne peuvent pas tenir des rôles équivalents dans la co-construction des savoirs.

Principe structurant 1 et séquence « GrandSoif »

Les éléments du principe structurant 1 qui a été inféré depuis les schémas d'action de Louise se retrouvent dans l'ensemble de la séquence « GrandSoif », notamment à travers la prise en compte des tentatives de solution à apporter au défi GrandSoif, des anticipations des élèves sur le comportement de l'eau laissé à l'air libre et de leurs explications au sujet de la disparition de l'eau liquide (cf. annexe B).

D'autre part, dans la séquence « GrandSoif », le terme « hypothèse » qualifie les explications des élèves face à la disparition de l'eau liquide (cf. Figure 54, p. 321). Selon un raisonnement similaire à celui mené dans le cas d'Amélie, le terme « hypothèse » revêt peu de caractéristiques

qui renvoient à son origine épistémologique et s'assimile plutôt aux « idées premières », aux rapports initiaux des élèves face aux objets de la situation.

Par conséquent, nous considérons que le PS1 est incorporé en filigrane dans l'ensemble du document-maître de la séquence « GrandSoif », modifiant au passage la signification qu'y prend le terme « hypothèse ». Le PS1 témoigne donc d'un adressage institutionnel qui organise l'action de Louise.

Principe structurant 3 et séquence « GrandSoif »

Selon le principe structurant 3, les modèles sont fournis aux élèves au début et fonctionnent comme des outils pour comprendre, expliquer et prédire des phénomènes naturels choisis par l'enseignant. Dans la classe de Louise, le PS3 a été inféré depuis les schémas d'action de l'enseignante, en particulier ceux qui agissent favorablement sur le degré de continuité entre les rapports aux objets construits par les élèves et ceux visés (L2, L2a, L2b, L2c).

Or, ces schémas d'action sont des contributions originales de la part de l'enseignante, qui n'existent pas dans la séquence GrandSoif. En effet, elle déploie des gestes diversifiés qui permettent aux élèves de s'approprier et de percevoir la fonctionnalité des modélisations de l'évaporation et de la condensation. Aucun de ces gestes n'est prescrit par le document-maître de la séquence GrandSoif (cf. Figure 54, p. 321).

Nous faisons l'hypothèse que c'est parce l'enseignante reconnaît la discontinuité qu'engendrent les modélisations du document de référence relativement aux rapports à l'objet « baisse du niveau de l'eau liquide » construits par les élèves qu'elle développe les schémas d'action L2, L2a, L2b et L2c. En effet, ces rapports ont montré que la conceptualisation de la vapeur d'eau est à construire intégralement pour les élèves. Cette conceptualisation nécessite de passer par deux pôles : d'une part, lorsque l'eau liquide disparaît, les élèves doivent maintenant repérer une nouvelle forme d'eau invisible appelée « vapeur d'eau » qui prend sa place et d'autre part, ils doivent être en mesure de différencier cette « vapeur d'eau » des brouillard/brume/buée, en opposition avec ce que le langage courant en dit. Les schémas d'action L2, L2a, L2b et L2c que l'enseignante met en œuvre trouvent donc une justification si on les interprète comme reflétant une prise en compte des nécessités épistémiques des situations dans lesquelles sont plongés les élèves. Certains de ces schémas d'action entrent d'ailleurs en opposition avec le document-maître de la séquence GrandSoif : par exemple, Louise choisit de dévoiler l'ensemble des modélisations (évaporation et condensation) alors que le document prescrit de n'amener que celle relative à l'évaporation à ce stade (cf. Figure 54, p. 321). Mais, si l'on considère qu'une partie de la conceptualisation de la vapeur d'eau passe par la différenciation avec le brouillard/la brume/la buée, il faut que les élèves soient capables de classer ces phénomènes sous l'état liquide, ce qui ne peut se réaliser qu'avec une modélisation de la condensation à disposition, d'où le choix de l'enseignante d'introduire les modélisations de deux changements d'état en même temps.

Par conséquent, nous considérons que, contrairement au PS1, le PS3 n'est pas le fruit d'un adressage institutionnel scolaire.

11.1.2.3 Conclusion

Le principe structurant 1, présent dans le document-maître de la séquence GrandSoif et distinguable à travers le schéma d'action L1 mis en œuvre par Louise, ne permet pas d'assurer une continuité entre les « idées premières », les rapports initiaux que les élèves entretiennent vis-à-vis de la disparition de l'eau liquide et les enjeux de savoir visés. En effet, Louise recueille ces « idées premières » puis finit par les ignorer, sans être en mesure de les négocier.

Le principe structurant 3, absent du document-maître de la séquence GrandSoif mais reconnaissable à travers les schémas d'action L2, L2a, L2b, L2c mis en œuvre par Louise, permet de donner aux élèves des moyens de construire la signification et de discerner le bien-fondé des modélisations de l'évaporation et de la condensation abruptement introduites. Ce principe structurant 3 témoigne d'une forme d'agentivité exercée par Louise qui permet aux élèves de combler l'écart entre leurs propres rapports à l'objet « baisse du niveau de l'eau liquide » et les modélisations visées.

11.1.3 Le cas d'Esther (secondaire, Genève)

11.1.3.1 Synthèse de l'analyse empirique de la classe d'Esther (cf. 9.5, p. 258)

Quel degré de continuité entre les rapports aux objets construits par les élèves et ceux visés par l'enseignante ?

Les élèves d'Esther ont l'occasion de développer des propositions qui expliquent l'évaporation au niveau moléculaire dans une première tâche et d'appliquer le modèle moléculaire de l'évaporation qui vient d'être institutionnalisé aux conditions optimales de séchage du linge dans une seconde tâche.

Dans les deux tâches, les propositions des élèves sont prises en compte, négociées et contribuent à l'avancée des savoirs :

- les caractéristiques pertinentes de leurs propositions sont reprises et renforcées à l'aide d'éléments issus de la référence déjà-partagée (par exemple, la pression comme facteur de décélération de l'évaporation, proposée par Esperan lors de la seconde tâche est soutenue par la définition microscopique de la pression qui fait partie de la référence déjà-partagée) ;
- les caractéristiques non-pertinentes sont exclues sur la base de contradictions effectuées à l'aide d'autres éléments de cette même référence (par exemple, l'expérience imaginée d'une accélération de l'évaporation sous la cloche à vide contredit la proposition « Collisions » imaginée par deux groupes lors de la première tâche) ;

D'autre part, après l'introduction du modèle institutionnalisé de l'évaporation qui fait intervenir des savoirs nouveaux que les élèves n'avaient pas été en mesure d'anticiper (notamment, le fait que les molécules de la surface du liquide créent des liaisons intermoléculaires plus faibles que les molécules au sein du liquide), les élèves se confrontent à une tâche d'application de ce modèle, ce qui leur permet d'éprouver sa fonctionnalité et sa raison d'être. En reliant les facteurs

d'accélération de l'évaporation au modèle moléculaire de l'évaporation, la seconde tâche permet de combler la micro-discontinuité générée par son introduction.

Ces conclusions nous ont permis d'établir qu'il existe un cheminement continu entre les rapports aux objets construits par les élèves et les rapports aux objets institutionnalisés par Esther.

Quels schémas d'action l'enseignante développe-t-elle au cours de la négociation des rapports aux objets construits par les élèves pour atteindre ce degré de continuité ?

E1) Esther met en œuvre une progression « cyclique » des tâches proposées aux élèves.

En amont de la séquence observée, au début de l'année scolaire, elle a amené un modèle moléculaire de la matière dans lequel la matière est représentée par un ensemble de molécules, qui ne se déforment pas, qui possèdent chacune une masse et qui sont plus ou moins fortement liées entre elles. À partir de ce modèle de départ, plusieurs situations expérimentales ont été portées à la connaissance des élèves et ont abouti à divers constats empiriques : compressibilité du gaz et incompressibilité du liquide, diffusion de matière dans un gaz ou un liquide, diffusion de chaleur dans un solide, dissolution d'un solide au sein d'un liquide, équilibre ou déséquilibre des pressions des gaz de part et d'autre d'une surface mobile, changements d'état, etc. Chacune de ces situations a fourni une occasion d'appliquer ou d'affiner le modèle moléculaire de départ, qui s'est, au moment des observations, enrichi de multiples composantes. Esther organise donc une complexification progressive des tâches s'organisant autour d'un unique enjeu qui se densifie au fil du temps : l'acquisition et la maîtrise d'un modèle moléculaire de la matière.

E2) Esther propose aux élèves d'évoluer au sein de milieux structurés avec en arrière-plan une référence déjà-partagée épistémiquement dense.

En effet, les milieux des tâches sont délimités par la mise en place d'expériences épurées (par exemple, l'observation de l'évaporation d'une goutte d'eau et d'une goutte d'alcool), ou d'évocation de phénomènes précis (les conditions optimales de séchage du linge), le tout étant accompagné de consignes contraignantes (expliquer ces phénomènes au niveau moléculaire). Quant à la référence déjà-partagée, elle se compose d'une référence de premier niveau (le modèle moléculaire en vigueur au moment des observations) et une référence de second niveau (une palette étendue d'exemples d'application de ce modèle aux divers phénomènes cités ci-dessus).

E3) Esther déploie une palette diversifiée de techniques chronogénétiques, topogénétiques et mésogénétiques qui lui permettent de négocier les apports des élèves dans le milieu.

Par exemple, elle contredit la proposition qui fait jouer un rôle causal aux molécules d'air dans le phénomène d'évaporation en se référant à une expérience imaginée faisant intervenir la cloche à vide ; elle renforce le caractère pertinent du déplacement organisé des molécules de l'air pour expliquer le rôle du vent dans l'évaporation en faisant appel à la référence de premier niveau ; etc. Par ailleurs, elle organise un ralentissement chronogénétique lorsque les objets récemment apportés sont radicalement nouveaux du point de vue des élèves : ainsi, dès

l'introduction du modèle complet de l'évaporation, elle leur propose une tâche d'application de ce modèle à une situation familière (le séchage du linge).

La conjonction de ces schémas d'action permet d'éclairer les conclusions formulées à propos des degrés de continuité :

- Les normes et habitudes spécifiques installées dans la classe (à travers la référence déjà-partagée de premier et de second niveau) ainsi que la structuration étroite du milieu (E1 et E2), permettent aux élèves de construire des rapports aux objets proches les uns des autres, d'une part et qui possèdent des caractéristiques communes avec les rapports aux objets visés par l'enseignante, d'autre part.
- La densité de la référence déjà-partagée fournit un panel d'arguments possibles à l'enseignante qui lui permet de négocier les rapports aux objets construits par les élèves (E3) à travers des gestes de contradiction et/ou de renforcement.

Ces deux points expliquent la continuité qui existe entre les rapports aux objets construits par les élèves et ceux qui sont institutionnalisés par l'enseignante.

11.1.3.2 Les formes d'épistémologie pratique dans la classe d'Esther

Nous nous intéressons maintenant à la façon dont Esther intègre et reconfigure les injonctions institutionnelles pour structurer ses pratiques de classe. Pour ce faire, nous identifions certains principes structurants qui émergent depuis les schémas d'action d'Esther. Puis, nous nous efforçons ensuite de mettre en résonance, lorsque c'est possible, ces principes structurants avec les caractéristiques des textes prescriptifs auxquels elle est soumise (plan d'études romand, moyens d'enseignement genevois).

Les principes structurants au cœur des schémas d'action d'Esther (E1, E2 et E3)

Avant d'identifier les principes structurants au cœur des schémas d'action d'Esther, nous développons une remarque qui concerne l'interdépendance de ses schémas d'action.

Le schéma d'action E3, relatifs aux gestes mesogénétiques et topogénétiques que l'enseignante développe afin de négocier les rapports aux objets construits par les élèves ne peut que se révéler *in situ*. Cependant, il est possible de considérer que ce schéma constitue un prolongement des autres schémas d'action E1 et E2 dans la mesure où c'est dans la référence déjà-partagée que l'enseignant puise les ressources qui lui permettent de construire des arguments afin d'accepter, de réfuter ou de modifier les propositions des élèves. Or, ce sont les schémas d'action E1 et E2 qui consolident progressivement une référence déjà-partagée. Ce sont donc ces schémas d'action E1 et E2 qui permettent au schéma d'action E3 d'exister *in situ* dans les pratiques. Autrement dit, il est intéressant de noter que les schémas d'action d'Esther se renforcent mutuellement. La logique de ce renforcement mutuel s'éclaire en admettant qu'ils dérivent tous du même principe structurant, comme nous le montrons à présent.

Les schémas d'action E1, E2 et E3 repérés depuis les pratiques de classe d'Esther, sont alignés avec les éléments du principe structurant PS3, déjà développé à partir des schémas d'action de Louise. Selon le PS3, les modèles sont fournis aux élèves et fonctionnent ensuite comme des outils pour comprendre, expliquer et prédire des phénomènes naturels choisis par l'enseignant.

Cette interprétation se consolide en tenant compte du discours d'Esther sur la fonction de la modélisation au sein de sa conception de l'enseignement :

« quand on va leur [aux élèves] donner une situation par exemple aller explorer les facteurs d'évaporation (...) ils doivent essayer de se servir de tout ce qu'ils ont accumulé/(...) la première chose que j'attends d'eux quand on travaille sur le modèle moléculaire ils doivent travailler à deux niveaux/ macroscopique et microscopique/et **puis le cœur de ce cours c'est pas qu'ils retiennent par cœur tous les types de molécules mais qu'ils soient capable de faire des liens entre un modèle qu'on leur fournit sur une certaine échelle et une réalité observable** » (entretien ante observation, Esther, min 13-14)

Le discours d'Esther reprend certaines caractéristiques du PS3 : selon elle, l'enseignement de la physique se fonde sur la modélisation, c'est-à-dire sur la confrontation entre constructions théoriques et faits expérimentaux.

Plus précisément, on peut considérer que les schémas d'action E1, E2 et E3 repérés depuis les pratiques de classe d'Esther, sont alignés avec une variante du principe structurant PS3, qui inclurait la possibilité d'enrichir les modèles pour les adapter à certains phénomènes :

Principe Structurant 3' : Le modèle comme moyen opératoire provisoire d'élucider les événements du monde naturel

Les modèles, fournis aux élèves dès le début, doivent fonctionner comme des outils pour comprendre, expliquer et prédire des phénomènes naturels choisis par l'enseignant. Si les modèles à disposition rendent partiellement compte d'un phénomène, il faut faire évoluer les modèles (en leur ajoutant certaines composantes, par exemple) de manière à intégrer ce phénomène à leur champ de validité. La manière de faire évoluer les modèles ne doit contredire aucune des composantes des modèles/théories existants (déjà appris).

Justifications didactiques / pédagogiques possibles :

Similaires au PS3.

Fondements théoriques possibles :

Similaires au PS3.

Le principe structurant d'Esther (PS3/PS3') vis-à-vis des textes prescriptifs

Le principe structurant 3/3' se trouve en filiation avec le PER et les moyens d'enseignement genevois (cf. Figure 55).

Attentes fondamentales
Au cours, mais au plus tard à la fin du cycle, l'élève...
...utilise un modèle moléculaire pour interpréter les caractéristiques des états de la matière
...utilise un modèle moléculaire pour interpréter ou prévoir l'évolution de phénomènes physiques : dilatation, diffusion dans les liquides et les gaz, changement de température

Objectifs

Amener les élèves à distinguer et à interpréter à l'échelle moléculaire l'ébullition et l'évaporation de l'eau.

Situation : *Après un orage, les routes mouillées finissent par sécher. Du linge mouillé étendu sur un fil sèche. L'eau est passée de l'état liquide à l'état gazeux sans que la température ait atteint les 100°C de l'ébullition ; on parle ici d'évaporation.*

Question : Quels sont, selon vous, les facteurs qui influencent la vitesse d'évaporation d'un liquide ?
Indiquez par écrit les facteurs sur lesquels vous pensez pouvoir agir pour augmenter la vitesse d'évaporation d'une quantité donnée de liquide. Le liquide doit être contenu dans un récipient. Expliquez vos choix.

Réponses possibles : Chaque groupe présente ses propositions à la classe. On peut s'attendre aux facteurs suivants: la présence visible du soleil (il s'agira, au cours du débat, de faire expliciter ce facteur pour le relier à la température), la température du liquide (un liquide s'évapore plus vite si sa température est plus élevée), le vent (un liquide s'évapore plus vite s'il y a du vent), la surface libre (un liquide s'évapore plus vite si sa surface libre est augmentée - étalement du liquide), la pression atmosphérique (à température égale, un liquide s'évapore plus vite en montagne qu'en plaine), la nature du liquide (l'alcool s'évapore plus vite que l'eau), etc.

Validation : Recherche d'un protocole expérimental pour chaque hypothèse. Chaque groupe présente ses propositions. Les protocoles retenus sont réalisés en classe ou à domicile. La description de la manipulation réalisée (schémas avec légende) ainsi que les résultats obtenus sont consignés dans un compte-rendu écrit d'expérimentation. Les résultats sont présentés à la classe.

Question : À l'aide du modèle moléculaire de la matière, essayez d'interpréter les résultats des expérimentations.

Réponse : Le modèle moléculaire permet de comprendre que l'évaporation d'un liquide est favorisée :

- en augmentant le rythme de sortie des molécules du liquide, ce qui peut se faire :
 - en augmentant le nombre des molécules les moins entourées, ce qui revient à augmenter la surface libre du liquide en étalant le liquide;
 - en augmentant l'agitation moyenne des molécules, ce qui revient à augmenter la température du liquide.
- en diminuant le rythme de retour des molécules dans le liquide, ce qui peut se faire :
 - en évacuant les molécules de vapeur avant qu'elles ne retournent dans le liquide, ce qui revient à renouveler la couche atmosphérique au-dessus du liquide en créant des courants d'air;
 - en diminuant l'effet couvercle occasionné par les chocs avec les molécules de l'atmosphère, ce qui revient à diminuer la pression atmosphérique.

Figure 55 : Extrait du PER (à gauche) et des moyens d'enseignement genevois (à droite)

Hormis quelques écarts mineurs, le principe structurant 3/3' peut être mis en relation avec le plan d'études et les moyens d'enseignement du canton de Genève : dans les deux cas, le savoir se construit en mettant en tension un modèle donné (au moins partiellement) aux élèves et des observables empiriques. Le PS3/PS3' est mis en place dans la classe d'Esther par le biais d'une

progression « cyclique » des tâches. La séquence s'affiche sous la forme d'une succession de tâches de structure similaire et de complexité croissante :

- présentation d'un modèle moléculaire de départ ,
- introduction d'un phénomène macroscopique - mise en lien des caractéristiques du modèle moléculaire avec certaines observables du phénomène afin d'expliquer et/ou de prédire son évolution - éventuellement, rajout de certaines caractéristiques au modèle moléculaire de départ ,
- introduction d'un nouveau phénomène macroscopique – mise en lien des caractéristiques du modèle moléculaire enrichi avec certaines observables du phénomène afin d'expliquer et/ou de prédire son évolution - éventuellement, rajout de nouvelles caractéristiques au modèle moléculaire déjà complété à l'étape précédente ,
- etc.

Cette interprétation, qui associe le PS3/PS3' avec les textes prescriptifs se consolide en tenant compte du discours d'Esther sur l'impact des moyens d'enseignement sur ses pratiques :

« je suis arrivée à un moment où y avait pas mal de matériel pédagogique déjà prêt pour la physique [les moyens d'enseignement genevois]/ donc là j'ai bénéficié du travail qui avait été fait par une commission cantonale/par des enseignants/je dirais ces dix dernières années/ ces quinze derniers années/donc **je suis arrivée déjà avec des fils rouges/ des fils conducteurs pour appliquer une démarche déjà bien mise sur pied/ je me suis énormément servie de ça pour rentrer dans l'enseignement** » (entretien ante observation, Esther, min 12)

Esther déclare percevoir une influence des moyens d'enseignement genevois sur sa pratique, pratique dont tous les schémas d'action s'organisent autour du PS3/PS3'. Le discours d'Esther constitue donc une indication supplémentaire en faveur d'une filiation entre le PS3/PS3', d'un côté et le PER et les moyens d'enseignement, de l'autre.

11.1.3.3 Conclusion

Les schémas d'action E1 et E2 ouvrent la voie à la pluralité des gestes de négociation embarqués dans le schéma d'action E3. Il est possible d'identifier le principe structurant 3/3' à travers l'ensemble des schémas d'action mis en œuvre par Esther. Selon le PS3/PS3', le caractère opératoire et fonctionnel des modèles est au cœur de la progression des savoirs.

De plus, le principe structurant 3/3' entretient un lien de parenté direct avec le plan d'études romands et les moyens d'enseignement genevois. Au final, au secondaire inférieur, en Suisse romande, et à Genève en particulier, les textes prescriptifs sont susceptibles de fournir une charpente solide à des séquences d'enseignement qui autorisent une continuité entre les rapports aux objets construits par les élèves et les rapports aux objets visés par l'enseignante.

11.1.4 Le cas de Nathan (secondaire, France)

11.1.4.1 Synthèse de l'analyse empirique de la classe de Nathan (cf. 10.5, p. 303)

Quel degré de continuité entre les rapports aux objets construits par les élèves et ceux visés par l'enseignant ?

Lors de l'expérience d'ébullition, les élèves sont davantage préoccupés par la solidité et l'efficacité du montage expérimental que par la formulation de constats concernant le comportement de l'eau en rapport avec la température relevée. Quelques observations éparpillées se construisent toutefois : des bulles sont observées sur un intervalle allant de 50 à 77°C, de la buée et de la « fumée » sont repérées à 50°C, etc. Quant à l'ébullition, les groupes d'élèves la repèrent sur un large intervalle de température allant de 38°C à 90°C. Aucun ne l'associe à la température de 100°C. La simultanéité de la stagnation de la température et de l'ébullition (ou d'un changement d'état de l'eau) n'est pas exprimée.

Lors de la discussion collective, Nathan décrit d'une manière tout à fait différente les observables : en effet, il installe dans le milieu les éléments d'observation qui frayent la voie à l'établissement du modèle du palier de température (présence de « petites bulles » avant 100°C et de « grosses bulles » à 100°C, ces « grosses bulles » définissant l'ébullition). Puis, il assume seul l'interprétation des nouveaux faits décrits, à travers l'introduction de ce modèle : la stagnation de la température se déroule conjointement au changement d'état liquide-vapeur que subit l'eau. Par conséquent, les élèves ont un rôle négligeable dans la construction des savoirs : ils n'apportent ni élément de modélisation ni élément d'observation pertinents ni lien entre les deux aspects. Ils sont réduits à être spectateurs des savoirs que l'enseignant déroule devant eux et ne participent jamais vraiment à la dynamique de leur construction. Il existe une discontinuité importante entre les rapports aux objets construits par les élèves lors de l'expérience, de la validation/invalidation des « hypothèses », de la discussion collective, d'une part et les rapports aux objets institutionnalisés par l'enseignant, d'autre part.

Quels schémas d'action l'enseignant développe-t-il au cours de la négociation des rapports aux objets construits par les élèves pour atteindre ce degré de continuité ?

N1) Nathan sollicite constamment les élèves pour donner leur avis et fait en sorte que la construction des savoirs semble se fonder sur les éléments du milieu apportés par les élèves, au risque de les soumettre à un contrat didactique de type « jeu de devinette » dans lequel les apports des élèves sont successivement rejetés jusqu'à ce que l'objet conforme à ses visées apparaisse. En début d'activité, plusieurs productions d'élève sont qualifiées d'« hypothèses » : les anticipations de l'évolution du comportement et de la température de l'eau au fur et à mesure qu'elle est chauffée, sa valeur maximale atteinte, l'allure de son graphe en fonction du temps.

N2) Il confronte les élèves à l'observation directe de certains phénomènes physiques, qu'il met en place sans contextualisation préalable dans le milieu. Ainsi, lors de l'expérience d'ébullition, la consigne qu'il donne aux élèves est très évasive sur ce qu'il convient de constater du comportement de l'eau, comme si le côtoiement direct de l'expérience était suffisant pour provoquer la reconnaissance des éléments d'observation pertinents.

N3) Il associe à chaque tâche proposée aux élèves une liste de quelques « compétences » qui sont censées être activées durant la réalisation de cette tâche. Ces « compétences », extraites de la grille de compétences que Nathan a conçue (cf. Figure 57, p. 334) se présentent comme des éléments de l'activité scientifique au sens large. Elles constituent parfois les seules contraintes données aux élèves pour mener à bien la tâche qui leur est dévolue, tout en se situant parfois en déphasage avec les enjeux de savoirs qu'elle vise. Ainsi, dans le cas de l'ébullition, les compétences présentes sur la fiche d'étude expérimentale ignorent le comportement de l'eau en rapport avec sa température (cf. Figure 56) : « suivre un protocole » (F4) ; « utilisation correcte du thermomètre » (F5) ; « tracer un graphique » (C7) ; « respect des consignes de sécurité » (S1) ; et « travailler en équipe avec méthode et dans le calme » (S3).

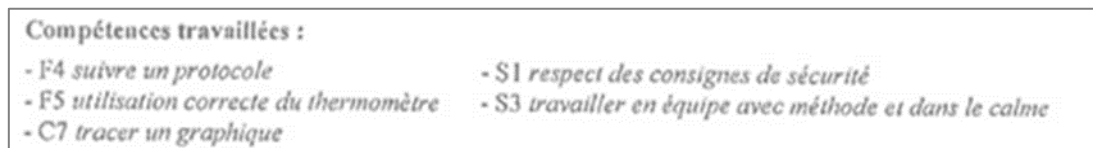


Figure 56 : En-tête de la fiche d'étude expérimentale de l'ébullition

La conjonction de ces schémas d'action permet d'éclairer les conclusions formulées à propos des degrés de continuité :

- Selon Nathan, l'observation brute de certains événements est assez robuste à elle-seule pour faire évoluer dans un sens favorable les rapports aux objets développés par les élèves (N2). Autrement dit, il surestime l'impact potentiel de l'expérience sur les modifications des rapports aux objets des élèves : en fait, les élèves retirent très peu d'éléments sur lequel peut s'appuyer Nathan pour construire le savoir dans la classe.
- Cet effet est encore aggravé par le contexte évaluatif qui ne se fonde que sur les compétences précédemment citées (N3). La nature de ces compétences encourage les élèves à interpréter la situation dans laquelle ils sont placés comme une évaluation de la rigueur avec laquelle ils se chargent des aspects pratiques de l'expérience. Les quelques constatations isolées qu'ils mènent s'éparpillent et ne sont pas notées ou mises en mémoire.

Lors de la discussion collective, les élèves ne sont donc pas en mesure de s'impliquer de manière productive dans la mise en commun des observations et dans la construction des interprétations des observations. Dans cette situation, la seule solution pour sembler encore se fonder sur les éléments du milieu apportés par les élèves (N1) est de déguiser une position de surplomb trop marquée, en faisant participer les élèves a minima, pour répondre à des questions fermées ou dichotomiques. Au final, l'ensemble des schémas d'action (N1, N2, N3) produit une discontinuité entre les objets construits par les élèves lors de l'expérience et ceux institutionnalisés par l'enseignant et retarde l'accès des élèves à la logique des objets que l'enseignant injecte dans le milieu.

11.1.4.2 Les formes d'épistémologie pratique dans la classe de Nathan

Nous nous intéressons maintenant à la façon dont Nathan intègre et reconfigure les injonctions institutionnelles pour structurer ses pratiques de classe. Pour ce faire, nous identifions certains

principes structurants qui émergent depuis les schémas d'action de Nathan. Puis, nous nous efforçons ensuite de mettre en résonance, lorsque c'est possible, ces principes structurants avec les caractéristiques des textes prescriptifs auxquels il est soumis (programme de physique-chimie, ressources académiques).

Les principes structurants au cœur des schémas d'action de Nathan (N1, N2 et N3)

Le schéma d'action N1, repéré depuis les pratiques de classe de Nathan, est aligné avec les éléments du principe structurant PS1, déjà identifié à partir des schémas d'action d'Amélie et de Louise. Selon le PS1, les élèves doivent s'exprimer durant tous les stades de construction des savoirs ; en particulier, leurs « idées premières » constituent le point de départ sur lequel fonder la construction des savoirs dans la suite de la séquence. Dans la classe de Nathan, le terme « hypothèse » recouvre les anticipations des élèves vis-à-vis de l'évolution du comportement et de la température de l'eau au fur et à mesure qu'elle est chauffée, de sa valeur maximale atteinte, de l'allure de son graphe en fonction du temps. Nous constatons que d'une part, ces prévisions ne sont pas justifiées par des propositions explicatives et que d'autre part, elles ne s'adosent à aucun cadre théorique partagé. Comme dans le cas d'Amélie et de Louise, le terme « hypothèse » revêt peu de caractéristiques qui renvoient à sa signification en usage dans les communautés scientifiques de référence. La configuration particulière que prend le terme « hypothèse » au sein des pratiques de Nathan nous pousse à considérer que son utilisation est plutôt en filiation avec le principe structurant 1.

Le schéma d'action N2, repéré depuis les pratiques de classe de Nathan, est aligné avec le principe structurant 2, déjà identifié depuis les schémas d'action d'Amélie. Selon le PS2, les éléments de modélisation constituent l'aboutissement des tâches proposées aux élèves, d'une part et la construction de ces éléments de modélisation procède par généralisation à partir des données de l'expérience, d'autre part.

Le schéma d'action N3, repéré depuis les pratiques de classe de Nathan, peut être modélisé par le principe structurant 4 suivant (PS4) :

Principe structurant 4 : les « compétences » comme pilotes des tâches

L'activité scientifique peut se décomposer en « compétences », qui constituent des objectifs d'apprentissage.

Les « compétences » pilotent la structuration des tâches proposées aux élèves : celles-ci sont conçues en fonction de certaines compétences qui sont choisies en amont par l'enseignant dans un souci de répartition de la totalité des « compétences » à maîtriser au long de l'année scolaire.

La liste des « compétences » est également utile aux élèves qui évaluent leur progression vis-à-vis de chaque « compétence » abordée.

Justifications didactiques / pédagogiques possibles :

- les « compétences » permettent de découper les objectifs d'apprentissage en unités simplifiées qui permettent de présenter aux élèves des tâches à leur portée ;
- les « compétences » permettent d'organiser le curriculum sur de longues périodes à travers une approche rationnelle de l'activité des élèves ;
- autres ?

Fondements théoriques possibles :

Le principe structurant 4 peut être considéré comme le résultat de l'agrégation :

- de certains travaux liés à la « pédagogie par objectifs », qui encouragent à définir précisément les objectifs attendus d'une séquence d'apprentissage, et à les décliner en sous-objectifs accessibles aux élèves (cf. 3.3.1)
- de certains travaux liés à la « pédagogie par compétences », dans lesquels est promu le développement de plusieurs compétences-clés que tout citoyen a intérêt à développer afin de faire face aux exigences sociales actuelles (cf. 3.3.1).

Plusieurs indications supplémentaires démontrent la structuration des pratiques de Nathan par le PS4. D'abord, Nathan a construit une « grille de compétences » pour chaque degré du secondaire inférieur (cf. Figure 57) :

RESTITUER LES CONNAISSANCES (mémoriser-énoncer)									
M	Je sais restituer mes connaissances dans les mêmes termes que la leçon et dans un contexte connu.								
APPLIQUER SES CONNAISSANCES (savoir et utiliser)									
A1	Je sais adapter mes connaissances pour résoudre un exercice (tâche simple).								
A2	Je sais sélectionner des données et utiliser des règles appropriées pour effectuer une tâche « complexe ».								
MAITRISE LA LANGUE (Graphie, orthographe, construction de phrases réponses)									
ML	Je sais formuler un message (écrit / oral) clair, précis, cohérent dans un français correct.								
S'INFORMER (Rechercher, Extraire et Organiser l'information utile)									
I1	Je sais extraire des informations d'un texte (énoncé d'exercice ou document écrit).								
I2	Je sais extraire des informations d'un schéma ou d'une image.								
I3	Je sais extraire des informations d'une représentation graphique.								
I4	Je sais extraire des informations d'un tableau de données (qualitatives ou quantitatives).								
FAIRE, RÉALISER, MANIPULER, MESURER CALCULER, APPLIQUER DES CONSIGNES									
F1	Je maîtrise les calculs de conversion.								
F3	Je sais construire un montage expérimental à partir d'un schéma.								
F4	Je sais mener une expérience en suivant un protocole explicite.								
F5	Je sais utiliser correctement les instruments de mesure.								
RAISONNER, ARGUMENTER, PRATIQUER UNE DEMARCHE EXPERIMENTALE									
R1	Je sais élaborer des hypothèses et proposer un protocole (expérimental ou non) pour les valider ou les invalider.								
R2	Je sais interpréter des résultats et tirer une conclusion d'un travail réalisé (synthèse).								
R3	Je sais faire la différence entre ce que je fais, ce que j'observe, ce que j'en déduis et ce que je conclus.								
R4	Je sais critiquer un protocole, une affirmation, un résultat.								
R5	Je sais argumenter en utilisant la notion de...								
R6	Je sais déterminer la précision de mes mesures.								
COMMUNIQUER (transmettre des connaissances ou révéler des compétences via un support de communication)									
C1	Je sais présenter un travail soigné et bien structuré.								
C2	Je sais rédiger un compte rendu d'expérience en respectant les différentes étapes de rédaction.								
C3	Je sais schématiser une expérience ou un circuit.								
C5	Je sais exprimer un résultat numérique (grandeur, unité, chiffres significatifs).								
C6	Je sais construire un tableau de données (avec grandeurs et unités).								
C7	Je sais construire un graphique (avec grandeurs et unités).								
ATTITUDE / AUTONOMIE / INITIATIVE									
S1	Je sais respecter des consignes (sécurité, bruit, soin, sacs) ainsi que le matériel mis à ma disposition.								
S2	Je sais travailler de manière organisée et méthodique.								
S3	Je sais travailler en équipe (écoute, entraide, initiative, répartition du travail et autonomie).								
S4	Je sais gérer mon temps.								

Figure 57 : La grille de compétences créée par Nathan qui correspond au niveau 5^{ème}

Cette grille présente deux particularités : d'une part, les « compétences » se présentent « décontextualisées » de tout contenu épistémique ; d'autre part, elles balayent l'ensemble des composantes de l'activité scientifique au sens large, y compris celles qui ne lui sont pas spécifiques, telle que « extraire des informations d'un document écrit ».

Ensuite, l'idée d'une modélisation du schéma d'action N3 par le principe structurant 4 est encore consolidée par l'analyse du discours de Nathan sur la fonction des « compétences » au sein de son enseignement :

« je me suis investi donc par compétences/ maintenant je me verrais pas enseigner autrement et évaluer autrement/(...) quand on fait des expérimentations/ quand on fait des démarches scientifiques de temps en temps/et bien on leur fait faire/ parce qu'on n'a pas le matériel/ parce qu'on est pris par le temps/ on fait **que** l'hypothèse/on va faire que l'hypothèse et proposition de l'expérience après on fait une mise en commun/ou après je vais leur donner un protocole à suivre parce que là ça va être la compétence "suivre un protocole" en respectant les règles de sécurité/(...) **je fais / la l'activité / en fonction des compétences que je veux travailler/(...)** donc avant que je rentre dans le groupe de formateurs là/ on faisait souvent/honnêtement/on

faisait toujours "suivre un protocole" ou "proposer un expérience"/donc après/ moi maintenant j'ai fait la liste [de compétences]/ donc il y a "critiquer un protocole" /je faisais jamais/ il a fallu que je modifie des activités pour faire critiquer un protocole/ parce **que à la fin [de l'année] moi je fais un petit listing/ je regarde ce que j'ai travaillé comme compétences** » (entretien post observation, Nathan, min 34-42)

Nathan déclare qu'il structure et conçoit les tâches proposées aux élèves en fonction des « compétences » qu'il souhaite faire travailler de façon préférentielle au cours d'une séance et qu'il veille à ce que toutes soient abordées au fil de l'année scolaire. Selon Nathan, la pression temporelle et les contraintes matérielles des situations de classe justifient de ne pouvoir travailler que quelques « compétences » à la fois, cette limitation permettant d'alléger ce qu'il reste à la charge des élèves. Les « compétences » sont considérées comme des lignes directrices majeures dans l'élaboration et la planification des tâches au sein de ses séquences d'enseignement.

En résumé, le PS4 permet de modéliser efficacement le schéma d'action N3. Il est d'ailleurs possible de considérer que Nathan surinvestit cette approche par « compétences » en leur faisant jouer un rôle encore plus central dans ses pratiques : lors d'une tâche donnée, les « compétences » en haut des « fiches d'activité » constituent l'essentiel des consignes données aux élèves, alors qu'elles sont souvent partiellement détachées des enjeux épistémiques des situations travaillées.

Les principes structurants de Nathan vis-à-vis des textes prescriptifs

Nous rappelons qu'au sein des programmes de physique-chimie du collège, la démarche d'investigation décrite selon un canevas en sept étapes se trouve en tension avec le tableau à trois colonnes (cf. 3.1.2.2) qui ne la mentionne plus mais qui distille à la place des « capacités », éléments de démarche d'investigation, qui sont associées à des connaissances particulières. Cette conception fractionnée de la démarche a progressivement essaimé vers la fin des années 2000 au niveau académique, au sein de certains groupes de travail formés par des inspecteurs régionaux et des enseignants volontaires en France. Le travail de ces groupes a notamment conduit à la production de « grilles de compétences » (cf. Figure 58).

Nom :						
Pratiquer une démarche scientifique ou technologique. Résoudre des problèmes.						
Rechercher Extraire et Organiser l'information utile.	1 - Rechercher les informations utiles.					
	2 - Extraire des informations (documents écrits, multimédia).					
	3 - Observer, extraire des informations d'un fait observé.					
	4 - Exploiter un graphique.					
	5 - Exprimer une loi par une phrase correcte.					
	6 - Traduire une loi par une relation.					

Figure 58 : Extrait de la « grille de compétences » créée par le groupe de travail de l'académie de Toulouse

D'une part, nous remarquons que les grilles de compétences conçues par Nathan (cf. Figure 57, p. 334) partagent des similarités avec la grille de compétences créée par le groupe de travail de

l'académie de Toulouse : élémentarisation de l'activité scientifique au sens large, décontextualisation des compétences par rapport aux savoirs en jeu

D'autre part, la fonction des grilles de compétences au sein de la pratique de Nathan se retrouve à l'identique dans les prescriptions académiques : la grille de compétences est censée guider l'enseignant pour concevoir des tâches en fonction des « compétences » qu'il souhaite faire développer aux élèves ; elle constitue un outil pour l'élève qui lui permet de visualiser l'évolution de sa maîtrise des différentes « compétences » au fil de l'année.

À travers les prescriptions académiques relatives aux « grilles de compétences », le PS4 témoigne donc d'un adressage institutionnel qui organise l'action de Nathan. Les autres principes structurants de Nathan (PS1, PS2) ne peuvent pas être mis en relation avec des caractéristiques du programme, ce qui signifie qu'ils reflètent des formes de multi-assujettissements accumulés dans la biographie professionnelle de Nathan, que nous ne pouvons pas nécessairement identifier dans les textes institutionnels actuels.

11.1.4.3 Conclusion

Dans la classe de Nathan, le schéma d'action N1, modélisé par le principe structurant 1, valorise l'expression des élèves, y compris sur des sujets sur lesquels leurs références sont limitées, ce qui engendre un contrat didactique de type « jeu de devinettes » qui donne l'illusion de se fonder sur leurs apports dans le milieu.

Le schéma d'action N2, modélisé par le principe structurant 2, met en avant la confrontation des élèves avec les données empiriques comme seul moteur d'une évolution favorable de leurs rapports aux objets vers les éléments de modélisations qui constituent les buts de la tâche. Dans les faits, cette évolution favorable se produit d'autant moins que les expériences proposées, déjà familières aux élèves, ne peuvent pas provoquer d'étonnement : aux yeux des élèves, il n'y a « rien à voir » (sous-entendu : rien de nouveau à voir).

Le schéma d'action N3, modélisé par le principe structurant 4, a pour conséquence une décomposition de l'activité scientifique en éléments discrets, les « compétences », qui sont censées piloter la structuration des tâches proposées aux élèves. L'aspect essentiel de cette décomposition est que, prise isolément, chaque « compétence » n'est pas une unité fonctionnelle qui renverrait à une finalité propre : une « compétence » n'acquiert une signification qu'au sein d'une activité prise dans un enjeu global. Or, les élèves ne sont pas en mesure de construire le lien entre les opérations élémentaires qu'on leur demande d'effectuer et la globalité de la tâche dans laquelle elles s'insèrent. En valorisant le travail de certaines compétences au détriment des autres, les tâches proposées laissent de côté certaines composantes essentielles au raisonnement scientifique, en particulier l'insertion dans une problématique et un cadre théorique déterminés²⁴.

²⁴ Nous avons produit une analyse qui étend ces conséquences à une autre activité au sein des pratiques de classe de Nathan, activité relative à la propriété de compressibilité des gaz et bâtie sur la même approche par « compétences » (Marty, Ligozat et Venturini, 2016).

Par conséquent, nous notons que les principes 1, 2 et 4 qui structurent les schémas d'action (N1, N2, et N3) dans la pratique de Nathan s'avèrent peu favorables à la construction d'une continuité entre les rapports que les élèves établissent aux objets du milieu et ceux institutionnalisés par l'enseignant.

11.1.5 Comparaison des principes structurants selon les quatre cas

Nous présentons d'abord un tableau qui résume la répartition des principes structurants dans les quatre classes observées (cf. Tableau 18).

	Amélie Primaire SR	Louise Primaire F	Esther Sec SR	Nathan Sec F
Principe structurant 1 Les « idées premières » des élèves comme points de départ de l'enseignement	X	X		X
Principe structurant 2 L'observation/expérimentation comme révélateur du modèle à apprendre	X			X
Principe structurant 3/3' Le modèle comme moyen opératoire (provisoire) d'élucider les événements du monde naturel		X	X	
Principe structurant 4 Les « compétences » comme pilotes des tâches				X

Tableau 18 : Répartition des principes structurants dans les quatre classes observées

Les principes structurants 1 et 2

Nous remarquons d'abord l'importance du principe structurant 1 qui organise les pratiques des classes d'Amélie, de Louise et de Nathan. Selon ce principe, il est important de prendre en compte les « idées premières » des élèves, c'est-à-dire les rapports qu'ils entretiennent vis-à-vis de certains objets du milieu, avant tout geste d'enseignement à leur propos. Dans le cas de Louise, ce principe structurant apparaît au sein du texte prescriptif qu'elle utilise pour enseigner les propriétés des états de l'eau (la « séquence GrandSoif »). Sous l'influence du PS1, la notion d'« hypothèse », présente dans tous les textes prescriptifs des contextes observés, est délestée de son aspect épistémologique : les « hypothèses » ne sont pas des modèles explicatifs qui se fondent sur un réseau théorique de concepts, de lois et de principes et qui doivent être soumis au contrôle de l'expérience.

Le principe structurant 2 possède une fonction importante au sein des pratiques de classe d'Amélie et de Nathan. Selon ce principe, les éléments de modélisation, qui constituent les buts de l'activité d'enseignement, sont inférés par généralisation à partir des données de l'expérience. Le principe structurant 2, qui n'apparaît pas dans les textes prescriptifs des

contextes observés, a cependant déjà été répertorié chez les enseignants : il fait traditionnellement partie de l'épistémologie pratique des enseignants spécialistes au secondaire (Cariou, 2010, 2011).

Le PS1 et le PS2 combinent des influences provenant de différents niveaux de détermination : didactique, pédagogique, scientifique, philosophique et épistémologique. Ils nous paraissent refléter des représentations vis-à-vis de l'enseignement des sciences qui se sont superposées, au fil des réformes scolaires, dans les différentes institutions auxquelles les enseignants sont assujettis : institutions de formation et de recherche, anciens curriculums, manuels scolaires, collectifs d'enseignants, etc. Ces deux principes témoignent probablement d'un effet de sédimentation des pratiques, dans le sens de Schneuwly et Dolz (2009).

Nous avons montré que le recueil des « idées premières » (PS1) et la place finale du modèle et son induction depuis les données empiriques (PS2) ne garantissent pas une continuité entre les rapports aux objets construits par les élèves et les rapports aux objets visés par l'enseignant. Mais nous reviendrons sur ce point dans la deuxième partie de la discussion.

Le principe structurant 3

Le principe structurant 3 bénéficie d'une place importante au sein des pratiques de classe de Louise et d'Esther. Selon ce principe, le savoir se construit en mettant en tension des éléments de modélisation fournis (au moins partiellement) aux élèves et des observables empiriques. Le contexte d'Esther (Suisse romande/Genève, secondaire) est le seul contexte dont les textes prescriptifs offrent un appui à la mise en place de gestes enseignants alignés avec le PS3 qui assurent une continuité entre les rapports aux objets construits par les élèves et ceux visés par l'enseignant. En contraste, Louise produit bien des schémas d'action qui reprennent les caractéristiques du PS3 et qui assurent une continuité au sein de l'expérience d'apprentissage des élèves, mais ces schémas d'action outrepassent les injonctions du document-maître de la séquence qu'elle utilise, séquence qui intègre majoritairement des aspects du PS1. Dans la deuxième partie de la discussion, nous reviendrons sur la continuité rendue possible par le PS3 en la revisitant sous l'angle de la nature contraignante des situations que l'enseignant propose aux élèves. Contrairement au PS1 et au PS2, les fondements théoriques du principe structurant 3 apparaissent plus spécifiques aux travaux de recherche issus de la didactique des sciences et ne semblent pas diffusées à grande échelle dans les institutions auxquelles sont assujettis les enseignants.

Le principe structurant 4

Le principe structurant 4 possède une fonction importante au sein des pratiques de classe de Nathan. Selon ce principe, l'élémentarisation de l'activité scientifique produit des « compétences », qui permettent de dégager des objectifs d'apprentissage et qui pilotent le format des tâches proposées aux élèves. Ce principe structurant apparaît au sein des ressources de l'académie auquel Nathan appartient. Nous avons montré que la structuration des tâches par les « compétences » n'assure pas une continuité entre les rapports aux objets construits par les élèves et les rapports aux objets visés par l'enseignant.

11.2 Conditions génériques de l'établissement d'une continuité entre rapports aux objets construits par les élèves et rapports aux objets visés par l'enseignant

À son entrée en classe, l'élève est susceptible d'entretenir des rapports avec certains objets de la thématique abordée lorsque ces objets possèdent une existence au sein d'institutions auxquelles l'élève est assujéti dans sa vie quotidienne. Le processus d'apprentissage consiste à faire évoluer ses rapports aux objets pour les rendre conformes à ceux désignés par l'institution scolaire. Il existe donc un décalage incontournable entre les rapports aux objets qui préexistent avant une séquence d'apprentissage donnée et ceux qui sont visés à l'issue de cette séquence. Les analyses empiriques menées dans notre étude nous ont montré plusieurs manières de combler ce décalage, qui engendrent plus ou moins de discontinuité vis-à-vis de l'expérience d'apprentissage de l'élève. Dans cette partie, nous procédons à un effort de catégorisation afin d'inférer des conditions favorables à l'établissement d'une continuité entre les rapports aux objets construits en classe par les élèves et ceux visés par l'enseignant. Ces conditions sont fondées sur un même postulat : pour établir cette continuité, il faut que l'enseignant soit en mesure de prendre en compte et de négocier les rapports aux objets construits par les élèves pour les faire évoluer à travers des ajustements qui les déplacent progressivement vers ceux visés.

Les analyses empiriques laissent apparaître deux modalités principales de co-construction des savoirs : selon la première, les savoirs sont censés se co-construire à partir des rapports que les élèves établissent face à des situations peu contraintes ; selon la seconde, les savoirs sont censés se co-construire à partir des rapports que les élèves établissent face à des situations contraintes. Dans la suite, nous explorons chacune de ces modalités et pour chacune d'entre elle : i) nous donnons une définition de ce qu'est une situation contrainte ou peu contrainte en l'illustrant par des exemples tirés de notre recherche ; ii) nous retraçons des déclinaisons des situations peu contraintes ou des situations contraintes au sein de certains travaux en didactique des sciences et de certains textes prescriptifs ; iii) nous présentons les résultats de nos travaux en termes de conséquences des situations peu contraintes ou des situations contraintes sur la continuité entre rapports établis par les élèves et rapports visés par l'enseignant ; iv) nous mettons en perspective ces résultats en les mettant en relation avec d'autres recherches de didactique des sciences.

11.2.1 Etablissement d'une continuité au sein de situations peu contraintes

11.2.1.1 Définition et exemples de situations peu contraintes

Un premier agencement possible des tâches consiste à faire le choix de partir des rapports que les élèves construisent face à des situations peu contraintes. Par « situation peu contrainte », nous entendons une situation dont : i) le milieu primitif est peu structuré, avec peu d'éléments définitoires et/ou ii) la référence déjà-partagée à propos des objets du milieu primitif est inexistante.

Les analyses empiriques menées font apparaître plusieurs de ces « situations peu contraintes » :

- En tout début de séquence, Amélie demande aux élèves de dessiner ou écrire toutes les choses auxquelles ils pensent à propos de l'eau. Dans ce cas, le milieu primitif est très peu structuré et la référence déjà-partagée est faible.
- En tout début de séquence, Louise demande aux élèves de prévoir ce que devient l'eau quand on la laisse dans un récipient à l'air libre. Dans ce cas, le milieu primitif est peu structuré et la référence déjà-partagée est faible.
- Après constat de la baisse du niveau de l'eau, Louise demande aux élèves ce qu'est devenue l'eau qui a disparu. Dans ce cas, la référence déjà-partagée est faible.
- Avant l'expérience d'ébullition, Nathan demande aux élèves d'anticiper l'évolution de la température quand on la chauffe. Dans ce cas, le milieu primitif est peu structuré (aucune mention du changement d'état à l'étude, par exemple) et la référence déjà-partagée est faible.

Certains chercheurs en didactique des sciences utilisent le terme « conceptions initiales » pour qualifier les rapports que les élèves construisent face à des situations peu contraintes, avec en arrière-plan l'idée que ces rapports reflètent des dispositions préalables à l'entrée dans un système didactique. Dans ce texte, en accord avec notre cadrage théorique, nous considérons que les rapports aux objets face à des situations peu contraintes sont bien des « construits » des élèves face à des situations qui sont sous contrat didactique, même s'ils se fondent principalement sur des références externes à la classe, issues de la vie quotidienne. Nous les avons précédemment dénommés « rapports initiaux » ou « rapports premiers » aux objets (cf. 2.3).

Les enseignants observés, quant à eux, les diffusent dans leur classe en les nommant souvent « hypothèses ». Or, nous avons déjà constaté que dans les pratiques, le manque de cadrage théorique et/ou méthodologique qui accompagne l'usage de ce terme montre qu'il est éloigné de sa signification d'origine de nature épistémologique. Il se rapproche parfois de l'anticipation des événements à venir. Dans les classes de sciences, cet amalgame entre « hypothèse » avec « anticipation » a déjà été constatée (Mathé, Méheut & De Hosson, 2008).

11.2.1.2 Les situations peu contraintes au sein de certains travaux en didactique des sciences et de certains textes prescriptifs

La position selon laquelle le point de départ privilégiée d'une tâche réside dans les rapports initiaux que les élèves entretiennent vis-à-vis de certains objets du milieu, avant tout geste d'enseignement à leur propos est défendue par certains textes prescriptifs et certains travaux en didactique des sciences.

Johsua & Dupin (1989) mettent en avant « le rôle joué par les conceptions premières des élèves dans les apprentissages scientifiques » et préconisent de « prendre les conceptions des élèves comme de véritables débuts de modélisations, et d'organiser une double confrontation, psychosociale d'un côté (par le débat entre pairs) et pratique de l'autre (à l'aide d'expériences-test) ».

Dans les programmes français, au primaire et au secondaire, la démarche d'investigation encourage l'émission de « conjectures » ou d'« hypothèses explicatives » au sein d'une situation choisie par l'enseignant en fonction de l'analyse des « conceptions » ou des « représentations » des élèves. Les situations de départ de la démarche d'investigation (situations-problème) peuvent être considérées comme peu contraintes dans la mesure où il n'existe pas de référence déjà-partagée à propos des objets qui la composent : les « hypothèses explicatives » des élèves reflètent des rapports initiaux face aux objets de la situation, largement basées sur des sources issues de la vie quotidienne.

Dans notre travail, le principe structurant 1 qui organise l'action d'Amélie, de Louise et de Nathan participe de cette même dynamique de valorisation des « idées premières » des élèves.

11.2.1.3 Résultats : Conséquences des situations peu contraintes sur la continuité entre rapports établis par les élèves et rapports visés

Nos analyses permettent de montrer que, lorsque les situations proposées aux élèves sont peu contraintes (milieu peu structuré et/ou référence déjà-partagée inexistante), l'enseignant manque de possibilités pour prendre en compte et négocier les rapports aux objets construits par les élèves. Plusieurs raisons président à ce constat :

- Les rapports aux objets construits par les élèves au sein de situations peu contraintes sont très différents les uns des autres. En effet, au sein d'un milieu peu structuré et sans référence déjà-partagée à disposition, ils ne peuvent dépendre que de l'expérience personnelle de chaque élève vis-à-vis des objets de la situation et possèdent une part de contingence élevée. La diversité des rapports aux objets qui se donne à voir empêche l'enseignant de réduire le milieu de la situation : l'enseignant ne peut pas mettre ensemble des propositions qui se ressemblent afin de pouvoir les négocier ensemble ou bien opposer des propositions contraires pour organiser une contradiction entre eux. Ces gestes de gestion des rapports aux objets, qui conditionnent une négociation efficace deviennent hors de portée.

Par exemple, les rapports à l'objet « eau » développés par les élèves d'Amélie recouvrent « la mer ; la vie ; une bouteille ; le jacuzzi ; le tsunami ; la couleur bleue ; le bateau, etc. ». Ces « conceptions » relatives à l'eau ne sont plus évoquées dans le reste de la séquence, avec raison : la grande diversité qui apparaît dans cette situation peu contrainte empêche l'enseignante de réellement s'appuyer sur les apports des élèves dans le milieu ; elle ne peut que les juxtaposer à un moment puis les ignorer dans la suite.

- Les rapports aux objets construits par les élèves au sein de situations peu contraintes s'avèrent souvent infructueux par rapport aux objets de savoir visés. À un moment ou à un autre, ils doivent être exclus du milieu. Puisque que la marge de négociation de l'enseignant est étroite (cf. dernier point), ils le sont souvent de manière autoritaire, sans pouvoir être pris en compte préalablement.

Par exemple, lorsque Louise demande aux élèves de prévoir ce que devient l'eau quand on la laisse dans un récipient à l'air libre, ils évoquent des modifications de température (l'eau devient plus chaude, plus froide, etc.), des modifications d'aspect (des bulles

apparaissent) et des modifications du niveau de l'eau. Or, Louise cherche à construire la notion de vapeur d'eau : la seule observation pertinente de son point de vue concerne la baisse du niveau de l'eau. Les autres prévisions, dont certaines peuvent être tout à fait correctes, parasitent la dynamique de construction des savoirs telle qu'elle l'a prévue. Elle choisit alors d'ignorer les prévisions concernant l'évolution de la température de l'eau puisqu'aucun thermomètre n'est mis en place pour confirmer/infirmier les prévisions des élèves. Le manque d'exploitabilité des rapports aux objets construits par les élèves dans des situations peu contraintes donne lieu à des exclusions en surplomb qui ne négocient pas les apports des élèves.

- Les rapports aux objets construits par les élèves au sein de situations peu contraintes s'avèrent souvent difficiles à corroborer ou à contredire, notamment par manque de protocole expérimental adéquat à mettre en place en classe. Ils ne peuvent souvent qu'être exclus du milieu de manière autoritaire, sans pouvoir être ni considérés ni négociés.

Par exemple, lorsque Louise demande aux élèves ce qu'est devenue l'eau qui a disparu, plusieurs propositions émergent : l'eau a été absorbée par le plastique ; l'eau est partie ailleurs (ciel, air, nuages) ; l'eau est partie dans la terre. Mais, dans le cadre de la classe, comment vérifier expérimentalement si l'eau de l'éprouvette est partie dans le ciel, dans la terre, dans le plastique de l'éprouvette ? La part de contingence et d'imprévisibilité des propositions des élèves amène Louise à ne pas les traiter du tout et à la place, à imposer dans le milieu le document de référence qui expose les modélisations de l'évaporation et de la condensation, modélisations qui permettront de cadrer les futurs rapports aux objets construits par les élèves.

- Enfin, l'enseignant manque de ressources pour négocier les rapports aux objets construits par les élèves : en effet, sans connaissances préalablement institutionnalisées à propos des objets du milieu, il ne peut que s'appuyer sur des références externes à la classe, qu'il présume partagées par les élèves de sa classe. Par exemple, Louise parvient à contredire la proposition d'un élève qui affirme que « l'eau fond » après constat de la baisse du niveau de l'eau liquide en faisant appel à l'expérience familière de la fonte d'un glaçon qui rajoute au contraire de l'eau liquide. Mais les occurrences de ce genre sont rares, et la marge de négociation de l'enseignant reste étroite devant les rapports aux objets construits au sein de situations peu contraintes.

En résumé, notre recherche montre que, face à des situations peu contraintes (milieu primitif peu structuré et/ou référence déjà-partagée inexistante à propos des objets du milieu), i) les rapports aux objets construits par les élèves sont dispersés et contingents, souvent infructueux par rapport aux enjeux de savoir visés par l'enseignant et difficiles à corroborer ou contredire par le biais de protocoles expérimentaux et ii) l'enseignant possède peu de ressources pour développer des arguments de négociation vis-à-vis de ces rapports aux objets. Ces facteurs expliquent, selon nous, la raison pour laquelle la continuité entre les rapports aux objets construits par les élèves et ceux visés par l'enseignante est difficile à établir au sein de ces situations.

11.2.1.4 Mise en perspective des résultats

Ces conclusions rejoignent celles des études qui se sont penchées plus spécifiquement sur les obstacles à la mise en place de la démarche d'investigation dans les classes en France au primaire et au secondaire (pour une synthèse, cf. Marlot & Morge, 2015).

Parmi les « difficultés de mise en œuvre de l'investigation », il est possible de lire que « la situation d'entrée trop ouverte ne contraint pas les questions " utiles " à l'élaboration des connaissances visées par le professeur », que « les hypothèses ne sont pas contrôlées par des connaissances théoriques et/ou des résultats antérieurs [ce qui rend] les propositions trop ouvertes et ingérables » et que « l'empirie n'est pas adaptée pour trancher entre les hypothèses » (Marlot & Morge, 2015, p. 127).

Cependant, pour notre part, nous ne considérons pas que ces lacunes de la « démarche d'investigation » soient imputables à la mise en œuvre défailante qu'en font les enseignants mais plutôt à un défaut de structuration intrinsèque à l'exposition de la démarche dans les textes prescriptifs, qui prétend pouvoir passer continuellement des rapports initiaux construits par les élèves aux savoirs scientifiques. Autrement dit, le problème nous semble davantage relever d'une estimation incorrecte de ce que les élèves sont en mesure de construire et de ce que l'enseignant est en mesure de négocier au sein de la démarche prescrite que d'un défaut de compréhension et/ou d'interprétation des enseignants vis à vis de ses caractéristiques.

11.2.1.5 Remarque : La confrontation des élèves avec des données empiriques brutes peut-elle faire évoluer favorablement les rapports qu'ils ont construits face à des situations peu contraintes ?

Avant de nous pencher sur la définition d'une « situation contrainte » et de délimiter ce qu'elle autorise par rapport à une « situation peu contrainte », nous nous intéressons aux dispositifs qui consistent à confronter les élèves avec des données empiriques brutes pour faire évoluer favorablement les rapports qu'ils ont construits face à des situations peu contraintes.

Dans notre travail, ce type de dispositif est incorporé par le principe structurant 2 selon lequel la construction des éléments de modélisation constitue le but de la tâche et procède par généralisation à partir des données de l'expérience. Ce principe organise l'action d'Amélie et de Nathan. Par exemple, dans la classe de Nathan, nous avons relevé que les prévisions initiales des élèves quant à l'évolution du comportement et de la température de l'eau chauffée (la présence de « vagues à 100°C », etc.) sont portées par des rapports aux objets issus de la pensée de sens commun, forgés au fur et à mesure de leurs contacts avec le phénomène familier d'ébullition. Ces prévisions ne sont pas remises en question par l'expérimentation, ce qui semble prévisible puisque que la situation (peu contrainte) ne pousse pas les élèves à observer le processus d'ébullition avec un regard différent de celui de la vie de tous les jours. Au final, les élèves modifient leurs rapports initiaux munis des mêmes références qu'ils avaient avant de réaliser l'expérience d'ébullition en les combinant éventuellement avec celles de leurs camarades : un élève continue à voir « des vagues » vers 100°C alors que les savoirs visés exigent d'y discerner des bulles de vapeur ; un autre élève est amené à invalider un objet

pertinent (« l'eau bout à 100°C »), au bénéfice d'un objet moins pertinent (« l'eau bout à 80-90°C »).

En résumé, il est improbable que la confrontation des élèves avec des données empiriques brutes fasse évoluer favorablement les rapports aux objets construits antérieurement au sein d'une situation peu contrainte, puisque les élèves reviennent sur leurs idées munis des mêmes références qu'ils possédaient avant de réaliser l'expérience (références issues de la vie quotidienne, des classes antérieures, etc.). Cette constatation n'est pas nouvelle : elle a notamment été établie à partir de considérations épistémologiques (Gohau, 1987 ; Johsua, 1989), et plus rarement, à partir de recherches empiriques (Luc, 2004). Pour dépasser le statu quo, il semble nécessaire que l'enseignant impose certaines contraintes à la situation, par exemple en structurant fortement le milieu d'observation (par exemple, en l'épurant de façon à rendre visible les paramètres pertinents de l'expérience).

11.2.2 Etablissement d'une continuité au sein d'une situation contrainte

11.2.2.1 Définition et exemples de situations contraintes

Un second agencement possible des tâches consiste à faire le choix de partir des rapports que les élèves construisent face à des situations contraintes. Par « situation contrainte », nous entendons une situation dont : i) le milieu primitif est fortement structuré, avec de nombreux éléments définitoires et ii) la référence déjà-partagé à propos des objets du milieu primitif est épistémiquement dense, ce qui signifie qu'elle contient des éléments de savoir déjà institutionnalisés à propos de ces objets. Ces éléments sont de différentes natures : il peut s'agir d'un ensemble d'objets et de phénomènes de nature empirique, d'un « capital d'expérience » sur lequel enseignant et élèves se sont accordés précédemment (le référent empirique) ; il peut s'agir d'éléments de modélisation, introduits au cours des séances précédentes (référence de premier niveau) ; il peut s'agir d'exemples d'applications des éléments de modélisation à divers phénomènes naturels (référence de second niveau).

Les analyses empiriques menées font apparaître plusieurs de ces « situations contraintes » :

- Après l'introduction des modélisations de l'évaporation et de la condensation qui prescrivent l'existence d'une forme d'eau invisible (la vapeur) et qui donnent des critères de reconnaissance de l'eau liquide (petites gouttes, fait d'être mouillé), Louise demande aux élèves de réexaminer le phénomène de « baisse de niveau de l'eau liquide ». Certains élèves sont en mesure de mettre en lien leur expérience vécue avec les modélisations introduites. D'autres se donnent le nouvel enjeu de « rendre visible » la vapeur d'eau en la transformant en buée.

Puis, Louise demande aux élèves de catégoriser la buée et le brouillard sous l'état physique approprié (solide, liquide, gaz). Certains élèves sont en mesure de catégoriser la buée sous l'état liquide en appliquant un des critères de reconnaissance de cet état (« les doigts deviennent mouillés lorsqu'on les passe contre une vitre embuée »). D'autres élèves sont capables de catégoriser le brouillard sous l'état liquide en construisant un nouveau critère de reconnaissance (« puisque la buée est classifiée comme liquide et que

lorsqu'on passe dans le brouillard, on est couvert de buée, alors le brouillard est aussi liquide »).

- Sachant que la référence déjà-partagée contient un modèle microscopique de la matière, de nombreux exemples d'application de ce modèle, et un référent empirique relatif à l'évaporation, Esther demande aux élèves d'expliquer le phénomène d'évaporation au niveau moléculaire. Certains groupes d'élèves proposent d'accorder un rôle causal aux molécules de l'air, qui viendraient percuter et expulser les molécules du liquide. Esther contredit cette proposition en arguant que l'évaporation qui se produit sous une cloche à vide en marche est accélérée.

Puis, sachant que le modèle moléculaire s'est enrichi d'une composante relative aux liaisons des molécules de surface, Esther demande aux élèves d'expliquer les conditions optimales de séchage du linge au niveau moléculaire. La plupart des élèves sont en mesure de développer des relations entre les facteurs macroscopiques d'accélération de l'évaporation (chaleur, surface en contact avec l'air, pression, vent) et les caractéristiques microscopiques du modèle moléculaire de l'évaporation.

11.2.2.2 Les situations contraintes au sein de certains travaux en didactique des sciences et de certains textes prescriptifs

La position selon laquelle le point de départ privilégié des tâches réside dans les rapports que les élèves entretiennent face à des situations contraintes par l'existence d'éléments de modélisation est soutenue par le Plan d'études romand et les moyens d'enseignement du canton de Genève. Nous avons déjà souligné à de multiples reprises que ces textes défendent une progression « cyclique » des tâches qui permet de construire le savoir en mettant en tension un modèle partiellement fourni et des observables empiriques. Ce cadre a d'ailleurs été posé par une certaine littérature francophone de didactique des sciences à partir des années 1990 ; nous avons décrit comment les séquences imaginées par Larcher & al.(1990), Chomat & al.(1988), Séré (1992), Genzling (1988) ou encore Méheut (1996) se basent sur l'introduction axiomatique d'un modèle particulière qui constitue l'outil pour penser toutes les situations qui sont présentées aux élèves par la suite : expansion ou compression des gaz, dilatation des solides et liquides, transitions de phase, etc. Chaque situation est construite de telle manière à ce qu'elle constitue une ressource pour les situations postérieures. Ainsi, l'articulation des situations est pensée dans le but de faciliter les élaborations intellectuelles à venir.

Ces recherches font partie d'un courant plus général qui promeut le caractère opératoire du modèle comme fondation à l'enseignement des sciences physiques : Robardet et Guillaud (1995), Lemeignan et Weil-Barais (1993), Tiberghien (1994) ; Tiberghien, Vince & Gaidioz (2009) sont quelques-uns des représentants de ces recherches qui ont notamment travaillé à la production de séquences dans d'autres domaines des sciences physiques (mécanique, électricité, énergie). À titre de comparaison, les travaux du groupe de recherche collaborative anciennement connu sous le nom Sesames, regroupant des chercheurs en didactique (dont A. Tiberghien) et des enseignants de l'enseignement secondaire ont abouti à la création d'une séquence de mécanique à destination des élèves de Seconde (première année du secondaire

supérieur). Cette séquence s'ouvre sur l'introduction du « modèle des interactions » qui impose les notions de système physique, d'interaction à distance, d'interaction de contact, et de force exercée par un système sur un autre. Le modèle est ensuite amené à être éprouvé sur différentes situations : une pierre suspendue à un élastique, un objet posé sur une table, la Terre qui tourne autour du Soleil, etc.

La forte proximité des structures de ces séquences d'enseignement (en mécanique et sur les propriétés particulières de la matière) nous permet de dégager des généralités concernant ce mode de construction des savoirs.

- D'une part, le modèle fourni est en décalage par rapport aux façons usuelles de penser le monde. Ce décalage est la raison pour laquelle le modèle ne peut pas faire sens tout de suite pour les élèves : il reste des choses à apprendre une fois la modélisation posée. Il s'agit alors d'aménager les milieux de l'étude, à travers une articulation choisie des tâches et un ralentissement chronogénétique de l'action, afin que les élèves puissent s'exercer à l'utilisation du modèle. C'est la confrontation avec une succession de phénomènes soigneusement mis en scène qui permet aux élèves de négocier le sens qu'ils placent derrière les termes du modèle et de faire évoluer progressivement leur rapport au modèle afin qu'il devienne compatible avec celui défendu par l'institution scolaire ou la communauté scientifique. À la fin de la séquence, la signification du modèle est supposée être suffisamment élucidée pour que les élèves disposent d'une certaine autonomie par rapport à son utilisation. En opposition avec le point de vue inductiviste qui envisage un passage progressif entre les données de l'expérience et le modèle visé, la rupture que provoque l'introduction du modèle est assumée et c'est l'aménagement de cette rupture qui permet au final de la dépasser.
- D'autre part, nous faisons l'hypothèse que c'est la spécificité des savoirs en jeu qui éclaire la raison pour laquelle ces deux sujets (mécanique, propriétés particulières de la matière) se prêtent bien au développement de séquences « cycliques » qui proposent des situations contraintes par des éléments de modélisation. Les modélisations liées à ces savoirs sont d'un niveau d'abstraction élevé ; leur rupture avec les façons de penser le mouvement ou la matière dans la vie quotidienne est évidente et il n'est plus tenable d'adopter une position inductiviste sur ces thématiques : même une excellente situation didactique ne peut prétendre faire inférer des données observables le concept de « force » ou de « molécules ». La spécificité abstractive des savoirs a donc été le moteur d'une réflexion sur les conditions d'aménagement de la rupture qu'ils engendrent afin que les élèves soient en mesure de participer au maximum à la construction des savoirs dans la classe.

Dans notre travail, ce type de dispositif se retrouve au sein des caractéristiques du principe structurant 3, principe qui organise l'action de Louise et d'Esther.

Puisque le modèle est fourni (en partie), l'apprentissage des sciences est davantage perçu comme un processus d'acculturation aux œuvres déjà-construites d'une société que comme un processus de construction ex nihilo des connaissances.

11.2.2.3 Résultats : Conséquences des situations contraintes sur la continuité entre rapports établis par les élèves et rapports visés

Nos analyses permettent de montrer que, lorsque les situations proposées aux élèves sont contraintes (milieu primitif structuré et existence d'une référence déjà-partagée contenant un référent empirique et/ou des éléments de modélisation et/ou des exemples d'applications de ces éléments à divers phénomènes), l'enseignant possède une marge de manœuvre importante pour prendre en compte et négocier les rapports aux objets construits par les élèves. Plusieurs raisons président à ce constat :

- Les rapports aux objets construits par les élèves au sein de situations contraintes sont ressemblants entre eux, d'une part et exhibent des traits pertinents par rapport aux savoirs visés, d'autre part. En effet, dans le contrat didactique, les élèves interprètent la situation dans laquelle ils sont placés en se basant sur les « habitudes spécifiques » de la classe par rapport aux objets du milieu. Dans le cas des situations contraintes, les élèves se fondent tous sur une même référence déjà-partagée, ce qui explique la similitude des propositions qu'ils développent. De plus, si la situation est choisie de manière à ce que certains éléments de la référence déjà-partagée constituent des ressources productives, les propositions de certains élèves sont susceptibles de contenir des traits pertinents que l'enseignant peut réutiliser à profit.

Par exemple, lorsqu'Esther demande aux élèves d'expliquer le phénomène d'évaporation au niveau moléculaire, plusieurs groupes d'élèves proposent d'accorder le même rôle causal aux molécules de l'air. Esther est donc en mesure de traiter ensemble ces propositions en donnant le même argument de contradiction. De plus, ces propositions contiennent également un trait pertinent qu'Esther reprend : l'évaporation consiste microscopiquement en une rupture des liaisons intermoléculaires des molécules de surface d'un liquide.

Autre exemple, lorsque Louise demande aux élèves de se pencher sur les cas de la buée et du brouillard, certains élèves sont en mesure d'amener des traits pertinents concernant leur catégorisation : la buée est à ranger du côté des liquides à cause des petites gouttes qui la constituent (ce critère de reconnaissance de l'état liquide existe dans la référence déjà-partagée) ; le brouillard est également à ranger du côté des liquides du fait de sa similitude avec la buée (la buée comme liquide vient de s'ajouter à la référence déjà-partagée).

- L'enseignant possède plusieurs ressources pour négocier les rapports aux objets construits par les élèves : en effet, il peut s'appuyer soit sur des éléments de la référence déjà-partagée soit sur des références externes, qu'il présume communes aux élèves de sa classe. Autrement dit, le caractère contraint des situations ouvre l'espace de négociation des rapports aux objets développés par les élèves. L'enseignant peut alors faire preuve d'une multiplicité de techniques mésogénétiques, chronogénétiques ou topogénétiques afin de corroborer les traits pertinents construits par les élèves ou, au contraire, contredire les traits non-pertinents de leurs propositions.

Par exemple, lorsqu'une élève de la classe d'Esther affirme que « le linge roulé en boule met plus de temps à sécher car ses molécules mettent davantage de temps à parvenir en surface », l'enseignante peut renforcer son idée en la mettant en relation avec la rupture des liaisons intermoléculaires des molécules de surface d'un liquide que préconise le modèle moléculaire de l'évaporation qui vient d'être institutionnalisé.

Autre exemple, lorsqu'un élève catégorise le brouillard comme appartenant à l'état gazeux, Louise est en mesure de convoquer la référence déjà-partagée pour contredire cette idée : puisque la vapeur d'eau est une forme d'eau invisible et que le brouillard se voit, le brouillard ne peut pas être à l'état gazeux.

En résumé, **notre recherche montre que, face à des situations contraintes par un milieu primitif structuré et une référence déjà-partagée contenant un référent empirique et/ou des éléments de modélisation et/ou des exemples d'applications de ces éléments à divers phénomènes, i) les rapports aux objets construits par les élèves sont convergents, d'une part et partagent des caractéristiques communes avec les savoirs visés, d'autre part et ii) l'enseignant possède une diversité de ressources pour développer des arguments de négociation vis-à-vis de ces rapports aux objets.** Ces facteurs expliquent, selon nous, la raison pour laquelle la continuité entre les rapports aux objets construits par les élèves et ceux visés par l'enseignante est facilitée au sein de ces situations.

11.2.2.4 Mise en perspective des résultats

Ces résultats impliquent une réflexion sur la nature des contraintes à donner aux élèves afin de provoquer des effets favorables en termes de continuité, réflexion d'autant plus décisive que l'imposition de contraintes présente toujours le risque de véhiculer des « savoirs inertes » du point de vue des élèves et finalement de revenir à un mode expositif de transmission des connaissances. Sur quelle référence déjà-partagée s'appuyer ? En particulier, quels éléments de modélisation sont-ils pertinents à fournir d'emblée aux élèves pour permettre la construction de nouveaux savoirs ?

Ces questionnements croisent d'autres travaux qui associent psychologie cognitive et didactique des sciences et qui s'intéressent à la notion de médiation cognitive dans l'enseignement :

« L'idée de médiation est associée à l'idée qu'entre le sujet qui apprend et le savoir, il y a un système médiateur permettant au sujet de s'en saisir de telle sorte qu'il puisse en être transformé. Toute la question est de déterminer la nature de ce système » (Weil-Barais & Resta-Schweitzer, 2008, p. 84)

« Transposées à l'enseignement scientifique, ces pratiques de médiation sociale se traduisent de la manière suivante : (1) les différentes conceptions des phénomènes, celles relevant du champ de connaissance et celui des élèves sont reconnues et élucidées ; (2) la négociation repose sur la proposition de connaissances accessibles aux élèves en regard de leurs acquisitions antérieures et en adéquation avec les objectifs de l'enseignement des sciences. Dans les propositions faites par Lemeignan et Weil-Barais (1993), à propos de l'enseignement de la mécanique au lycée, il s'agit de concepts et de

modèles qualifiés de « précurseurs », au sens développemental du terme : ces modèles présentent certaines des caractéristiques des concepts et modèles savants du programme d'enseignement (le modèle de Newton) mais pas toutes, ce qui fait qu'ils ne permettent de traiter qu'une gamme restreinte de situations (par exemple, déplacement dans une seule direction et non pas dans l'espace tridimensionnel). Ces concepts et modèles précurseurs sont exprimés au moyen d'un système sémiotique accessible aux élèves. De fait, l'écart est tel entre les conceptions en mécanique des élèves et la physique newtonnienne, que plusieurs modèles précurseurs se sont avérés nécessaires. Ainsi, la médiation progresse à travers l'acceptation par les élèves d'une suite de propositions à caractère hypothétique compatibles avec les expériences réalisées, de plus en plus élaborées, au plan conceptuel et sémiotique (...) Cette conception de la médiation qui met l'accent sur la conciliation et le compromis présente l'avantage de reconnaître la dimension potentiellement conflictuelle de tout apprentissage ainsi que les difficultés des élèves à accepter des connaissances nouvelles. La référence à un tel modèle conduit à s'interroger sur les caractéristiques épistémologiques des connaissances enseignées en regard des connaissances actuelles des élèves, sur les activités cognitives qu'elles requièrent ainsi que sur les situations et les aides à apporter (la tutelle) pour que les élèves puissent les maîtriser. Cette conception permet également de penser la médiation comme un processus se déroulant dans le temps qui va se traduire par des déplacements de points de vue, à la fois de la part des élèves et du médiateur » (Weil-Barais & Resta-Schweitzer, 2008, p. 88-89)

Nous retenons de ces études que les éléments de modélisation susceptibles de venir contraindre productivement les rapports aux objets construits par les élèves possèdent les signes distinctifs suivants :

- Ils doivent être construits de telle façon que la discontinuité qu'ils génèrent ne soit pas insurmontable au point que les élèves ne sauraient pas du tout s'en saisir : dans le vocabulaire de Weil-Barais & Resta-Schweitzer, il s'agit de « modèles précurseurs, exprimés au moyen d'un système sémiotique accessible aux élèves ». Les élèves doivent être en mesure de s'essayer tout de suite à une prise en main des éléments de modélisation introduits, tout en sachant que ceux-ci feront sans doute l'objet de multiples négociations qui aboutiront à une stabilisation de la signification de ses termes.
- Chaque élément de la référence déjà-partagée doit posséder un avenir dans la construction des savoirs dans la classe. L'articulation des situations est cruciale, chacune d'entre elle étant construite de telle manière à ce qu'elle constitue une ressource pour les situations postérieures, d'où l'aspect « cyclique » répertorié plus haut. En particulier, les éléments de modélisation doivent permettre une évolution vers un modèle final « savant », en bénéficiant des enrichissements successifs du modèle de départ.

11.3 Retour sur le postulat d'une analogie entre apprentissage des savoirs scientifiques à l'école et production des savoirs au sein des communautés scientifiques

Dans l'introduction, nous avons mentionné la conception actuellement dominante de l'enseignement-apprentissage des savoirs scientifiques selon laquelle les savoirs pourraient s'apprendre selon des procédures analogues à celles mobilisées par les scientifiques pour les produire dans les institutions de référence. Il s'agit d'une question de transposition didactique : quels aspects des pratiques scientifiques de référence sont exclus du processus de transposition ? Et lesquels sont retenus ? Sur quels critères fonder les choix des aspects retenus/exclus des pratiques de référence ? Comment les aspects retenus sont-ils transposés pour satisfaire aux contraintes de la classe ?

Dans cette partie, nous nous limiterons à traiter du processus transpositif qui concerne deux aspects des pratiques scientifiques de référence : la nature et la fonction de l'hypothèse, d'une part ; la nécessité d'un corpus de savoir existant pour engendrer de nouveaux savoirs, d'autre part. Nous concluons en contribuant à la réflexion soulevée par les questions relatives au processus de transposition dans les pratiques d'enseignement des sciences.

11.3.1 Le parcours transpositif d'un aspect des pratiques scientifiques de référence : la nature et la fonction de l'hypothèse

Le parcours transpositif de la notion d'« hypothèse » est intéressant à analyser : selon les usages des communautés scientifiques qui utilisent le terme, elle peut être définie comme un modèle interprétatif provisoire qui doit être soumis au contrôle de l'expérience et qui s'appuie sur un arrière-plan théorique et méthodologique accepté par une communauté donnée.

Au bout de la chaîne transpositive, au sein des pratiques de classe, un seul aspect de la définition de l'hypothèse a été retenu : son caractère provisoire, l'incertitude vis-à-vis de sa véracité, autrement dit le « droit à l'erreur » (p. 62) dont parle Mathé, Méheut & De Hosson (2008).

Les processus de transposition interne et externe ont balayé l'appui des hypothèses sur des cadres théoriques et méthodologiques préexistants, aspect pourtant fondamental dans les pratiques scientifiques comme nous le montrons dans le paragraphe ci-dessous (cf. 11.3.2). À la place, les élèves sont censés s'appuyer sur des références issues de la vie quotidienne, ce qui revient à faire des hypothèses le reflet des « conceptions initiales », en accord avec le principe structurant 1, dont nous avons montré le poids au sein des pratiques de classe que nous avons observées.

D'autre part, en opposition avec le caractère explicatif ou interprétatif des hypothèses dans les pratiques scientifiques, les hypothèses en classe sont souvent assimilées aux prévisions ou anticipations de phénomènes, dont certaines relèvent du simple pari ou de la devinette.

<i>L'usage du terme « hypothèse » dans les pratiques scientifiques</i>	<i>L'usage du terme « hypothèse » dans les pratiques de classe observées</i>
<ul style="list-style-type: none"> - modèle interprétatif - provisoire et qui peut/doit être soumis au contrôle de l'expérience - qui s'appuie sur un arrière-plan théorique et méthodologique accepté par une communauté donnée 	<ul style="list-style-type: none"> - anticipation / prévision / proposition explicative (rarement) - provisoire, « droit à l'erreur » - qui s'appuie sur des références externes à la classe, souvent issues de la vie quotidienne (les « conceptions initiales »)

Tableau 19 : Résumé du parcours transpositif du terme « hypothèse »

Le parcours de la notion d'« hypothèse » montre particulièrement bien cet effet d'intégration/d'exclusion/de transformation propre à la transposition didactique (cf. Tableau 19). Dans ce travail, nous avons montré quelques-uns des effets possibles de cette modalité de transposition en termes de continuité entre rapports aux objets établis par les élèves et rapports aux objets visés par l'enseignant.

11.3.2 Le parcours transpositif d'un aspect des pratiques scientifiques de référence : la nécessité de l'existence d'un corpus de savoir existant pour produire de nouveaux savoirs

Passons maintenant à un autre aspect des pratiques de référence : la nécessité de maîtriser des cadres théoriques et méthodologiques préexistants pour construire de nouveaux savoirs. L'importance de cet aspect des pratiques scientifiques a été mise en évidence autant au niveau de l'histoire des sciences que de la sociologie des sciences. En prenant l'exemple de l'anatomie et de l'astronomie, Wootton souligne le rôle décisif de l'invention de l'imprimerie par rapport à l'émergence de la science moderne. Les textes imprimés fournissent un arrière-plan commun à une communauté donnée : ils permettent aux scientifiques émergents de se positionner en faveur (ou contre) des contenus stabilisés et référencés, ce qui donne lieu à des débats scientifiques, de nouvelles découvertes, etc. Selon Wootton, ce sont à ces conditions que les savoirs scientifiques sont susceptibles de se développer :

« [A] fundamental feature of the Scientific Revolution is the impact of the printing press. (...) Sophisticated printed illustrations based on perspective drawings thus turned anatomy into a progressive science, where each generation of anatomists was able to identify mistakes and oversights in the work of their predecessors. (...) Printing created a community of astronomers, working on common problems with common methods, and reaching agreed solutions » (Wootton, 2015, p.184-198)

Quant à Kuhn, il s'interroge sur la méthode de formation d'un scientifique :

« La caractéristique la plus frappante de cette éducation [en sciences] est d'être, à la différence d'autres domaines créatifs, entièrement effectuée grâce

à des manuels. Les étudiants typiques de licence et de doctorat en chimie, physique, astronomie, géologie ou biologie apprennent la substance de leurs domaines dans des livres spécialement écrits pour des étudiants. Jusqu'à un moment où ils sont prêts, ou presque prêts, à entreprendre le travail nécessaire à leur thèse de doctorat, on ne leur demande pas de se lancer dans des projets de recherche expérimentaux (...) En réalité, ces livres présentent les solutions concrètes aux problèmes, auxquelles la profession a conféré le statut de paradigme. Puis, il demande à l'étudiant (...) de résoudre des problèmes tout à fait semblables par la méthode et le contenu à ceux qu'il a déjà rencontrés dans le manuel. (...) [L'éducation en sciences de la nature] reste une initiation dogmatique dans une tradition préétablie que l'étudiant n'a pas les moyens d'évaluer. (...) Cette technique d'exposition à une tradition rigide a été immensément productive et a permis des innovations extraordinaires » (Kuhn, 1959, p. 308-309)

Autrement dit, un étudiant ne devient prêt à mener ses propres recherches qu'une fois intégrés les théories, les méthodes et les problèmes « exemplaires » de son champ, qu'une fois assimilées les composantes du paradigme de recherche dans lequel il se situe.

En résumé, ces études en histoire des sciences et sociologie des sciences montrent que de nouveaux savoirs en science ne peuvent commencer à se construire qu'à partir d'un arrière-plan commun formé de certains cadres théoriques et méthodologiques et de problèmes considérés comme accessibles via ces cadres. Cet aspect des pratiques scientifiques est peu référencé dans la littérature de didactique des sciences et dans les textes prescriptifs, et avec raison, semble-t-il à première vue : les élèves, par définition, rentrent dans l'enseignement scientifique sans aucune culture disciplinaire et c'est bien à cet enseignement que revient la mission de la leur faire acquérir. Pour autant, cela veut-il dire que l'aspect relatif aux cadres théoriques comme préalable à la construction de nouveaux savoirs ne serait pas « transposable » ?

En réponse à cette question, nos recherches montrent (à partir de l'observation des classes de Louise et d'Esther) que :

- D'une part, au sein de l'enseignement des sciences physiques, cet aspect des pratiques scientifiques a bien la possibilité d'être transposé à condition de le faire évoluer pour le rendre compatible avec l'état cognitif des élèves. D'abord, il s'agit de modifier les éléments de modélisation qui sont censés constituer les supports des raisonnements des élèves en les rendant accessibles à leur entendement dès leur introduction dans le milieu (« les modèles précurseurs » selon Weil-Barais & Resta-Schweitzer, 2008). Ensuite, il s'agit de reconnaître le décalage qu'ils engendrent par rapport aux manières usuelles de penser le monde en aménageant un espace afin que le sens de ces éléments de modélisation puisse être progressivement négocié à travers des interactions enseignant-élèves à propos de phénomènes physiques choisis en amont par l'enseignant.
- D'autre part, l'aspect des pratiques scientifiques relatif au rôle des cadrages préétablis s'avère particulièrement intéressant à importer dans l'enseignement de la physique, car sous les conditions précitées, il autorise l'installation d'une continuité entre les rapports aux objets construits par les élèves et ceux visés par l'enseignante, comme nous l'avons

exposé à partir de l'étude empirique de certaines pratiques d'enseignement/d'apprentissage qui font évoluer les élèves au sein de situations contraintes par l'existence d'éléments de modélisation. Nous partageons alors « l'hypothèse optimiste » de Weil-Barais & Resta-Schweitzer (2008) :

« L'hypothèse optimiste que nous pouvons avancer est que la qualité du système de médiation pourrait être un déterminant majeur de l'engagement de l'enfant : se sentant compris et soutenu, il est en meilleure position pour s'investir dans les apprentissages » (p. 96)

C'est dans les cas où les rapports aux objets que les élèves construisent sont pris en compte et négociés par l'enseignant que l'investissement des élèves se matérialisent véritablement dans la co-construction des savoirs, ce qui ne peut être sans effet sur leur niveau d'engagement vis-à-vis des disciplines scientifiques sur le long terme.

11.3.3 Conclusion provisoire

Finalement, au vu de cette discussion sur la transposition de ces deux aspects de la pratique scientifique, sur quels critères fonder les choix des aspects retenus des pratiques scientifiques de référence à des fins de transposition dans les classes ?

Pour notre part, nous considérons que, pour concevoir efficacement des dispositifs d'enseignement scientifique, il faut déterminer de quelle manière les aspects de la pratique des experts sont susceptibles d'être productifs pour les apprenants : autrement dit, il s'agit de juger la transposition des aspects de la pratique de référence à l'aune de ce qu'ils permettent aux élèves de construire et à l'enseignant de négocier au sein de situations données.

Nous avons montré que l'aspect relatif à la maîtrise d'un corpus de savoir existant répond favorablement à ce critère, à condition de lui faire subir certaines adaptations. Ce travail d'évaluation reste à mener pour d'autres aspects des pratiques scientifiques de référence : il s'agit, selon nous, d'une perspective de recherche pour la didactique qui s'est encore peu penchée sur le processus de transposition envisagé sous l'angle de la productivité pour l'apprentissage, productivité caractérisée selon une démarche ascendante.

CONCLUSION

Le projet de la thèse était de contribuer à la question de la nature du rapport entre apprentissage des savoirs scientifiques à l'école et production des savoirs au sein des communautés scientifiques à travers une analyse ascendante de plusieurs études de cas centrées sur l'enseignement / apprentissage des propriétés de la matière. Nous nous sommes situés au primaire et au secondaire inférieur, en France et en Suisse romande, au sein de contextes où les références épistémologiques et didactiques se sont avérées assez contrastées pour produire des curriculums divergents sur certains points cruciaux de l'enseignement des sciences.

Les éléments de théorisation retenus proviennent majoritairement de deux sources d'inspiration : le paradigme de l'interactionnisme social et l'approche pragmatiste de la construction des rapports aux objets en situation scolaire qui ont fourni des lignes directrices à notre travail. D'une part, l'enseignant et les élèves ajustent chacun leur propre ligne d'action en interprétant celle de l'autre, depuis les postures dissymétriques qui les caractérisent, cette idée étant à la base de la modélisation de l'action conjointe en didactique ; d'autre part, le rapport personnel d'un individu à un objet se construit à travers les interactions que l'individu peut avoir avec cet objet, dans l'ensemble des institutions dans lesquelles cet objet existe, que ce soit dans un cadre familial, scolaire ou autres. Le premier niveau d'analyse a priori (cf. Chapitre 6) a d'ailleurs consisté à recenser les rapports aux objets relatifs aux propriétés de l'état gazeux que les élèves sont susceptibles d'entretenir avant d'aborder les séquences enregistrées. L'idée de rapport aux objets vise à se placer à la hauteur de la lecture de la situation par l'individu : elle est soutenue par un point de vue institutionnel, qui relie les rapports aux objets avec des jeux de langage propres à une pratique sociale donnée, sur fond de règles socialement partagées. L'approche pragmatiste nous a amenés à accorder une place importante à la façon dont les rapports aux objets se construisent et évoluent en classe, au regard des rapports aux objets que l'institution scolaire entreprend de stabiliser. Dans ce cadre, la notion de continuité qualifie la nature de l'évolution de ces rapports aux objets (avec coupure, avec régularité, etc.) et nous a semblé à même de caractériser l'expérience d'apprentissage du point de vue des élèves.

Dans ce paragraphe, nous développons quelques apports, limites et prolongements de ce travail sur l'idée de continuité entre rapports aux objets construits par les élèves et rapports aux objets institutionnalisés par l'enseignant :

- Un apport majeur du travail nous semble d'être arrivés à caractériser le point de vue de l'élève et en particulier, d'être arrivés à le détacher d'une certaine détermination causale vis-à-vis des gestes de l'enseignant. Nous avons ainsi pu montrer que la continuité de l'expérience vécue d'apprentissage n'est pas donnée par les techniques topogénétiques mises en œuvre par l'enseignant. En particulier, une posture d'accompagnement de l'enseignant ne garantit pas une continuité, comme dans la situation banale où l'enseignant recueille et diffuse les rapports aux objets construits par les élèves mais finit par imposer le sien, se trouvant dans l'impossibilité de les exploiter dans son sens. Inversement, une certaine continuité n'est pas empêchée par une posture de surplomb de l'enseignant, à

condition de cette posture installe des rapports aux objets que les élèves sont prêts à accueillir. De façon générale, l'ensemble des postures que prend l'enseignant pour réguler la répartition des responsabilités de chacun ne peut pas tenir seule pour rendre compte de la continuité de l'expérience d'apprentissage des élèves.

- Au niveau des limites, il est souvent difficile de placer la « continuité » sur le continuum entre les deux extrêmes qui sont, d'un côté, la rupture de contrat dans laquelle l'enseignant montre clairement que les rapports aux objets construits par les élèves ne correspondent pas à ses attentes et, de l'autre côté du spectre, la reprise complète des rapports construits par les élèves pour appuyer son projet d'enseignement. Mais, au-delà de la maladresse de l'expression « degré de continuité » qui sous-entend une quantification déjà difficile à apprécier, déterminer, en pratique, si un extrait donné reflète une continuité entre rapports construits par les élèves et rapports institutionnalisés par l'enseignant s'est révélé encore plus ardu : il est possible d'entendre l'enseignant reprendre intégralement ce qu'un élève propose, sans que ce geste soit révélateur d'une quelconque continuité, parce qu'un même objet (par exemple, « l'eau s'est évaporé ») peut prendre différentes significations, l'une issue de la vie quotidienne (« l'eau a disparu comme la flaque d'eau qui n'est plus là le lendemain de pluie »), l'autre issue de la communauté scientifique de référence (« l'eau liquide s'est transformée en une forme d'eau invisible et inodore, la vapeur d'eau »). D'autre part, l'enseignant peut reprendre intégralement ce qu'un élève propose alors même que cet objet a été établi de manière fortuite ou bien grâce à des savoirs externes à la classe que l'élève possédait déjà et qui ne représentent pas l'état de savoir de tous les autres : dans ces cas-là aussi, il est impossible de parler de continuité de l'expérience d'apprentissage des élèves même si une continuité de façade existe dans le discours des participants. Au final, la continuité ne peut pas être caractérisée seulement à l'aide d'indices internes à un extrait donné mais charrie des éléments des contextes institutionnels au sens large voire des éléments propres à une culture donnée. Dans ce processus, le travail du chercheur a mobilisé beaucoup d'implicites et à ce stade, il est possible d'affirmer que la caractérisation d'une continuité entre rapports aux objets construits par les élèves et rapports aux objets institutionnalisés par l'enseignant manque encore de critères objectifs. Des entretiens avec certains élèves auraient certainement pu constituer un complément intéressant pour déterminer de manière un peu plus fine la continuité dans l'expérience d'apprentissage.

Puis, à partir d'une analyse comparatiste des schémas d'action qui ont été inférés depuis les pratiques dans les quatre contextes, nous avons modélisé des principes qui, selon nous, structurent les schémas d'action des enseignants ; et nous avons formalisé des types de situations qui autorisent/prohibent une continuité entre rapports aux objets construits par les élèves et rapports aux objets visés par l'enseignant, situations dont nous estimons qu'elles possèdent une portée générique. Cette démarche comparatiste nous porte à faire une distinction entre la comparaison directe, qui vise à mettre en évidence des similitudes par simple juxtaposition et le comparatisme (indirect) qui vise à établir des phénomènes génériques à l'aide d'un tiers comparant, constitué dans notre travail, par les catégories conceptuelles de la

modélisation de l'action conjointe. La comparaison directe des pratiques de classe nous instruit sur les manières de faire communes du professeur et/ou des élèves, ces points communs signant la spécificité épistémologique de l'objet enseigné, par exemple le travail sur la modélisation, présente dans tous les contextes. Le comparatisme indirect nous permet d'identifier des phénomènes génériques dans ces manières de faire, phénomènes non visibles directement, mais construits à l'aide des catégories de la modélisation de l'action conjointe. Les principes structurants et les conditions d'une continuité entre les rapports aux objets construits par les élèves et les rapports institutionnalisés dans la chronogenèse par l'enseignant sont des phénomènes de cet ordre. Sur le plan méthodologique, toutefois, notre choix d'utiliser des objets de savoir très proches pour mener les comparaisons (les propriétés des états de la matière) a eu tendance à nous faciliter l'identification des points communs, qui signent la spécificité du fonctionnement des objets de savoirs, et nous compliquer l'accès aux phénomènes génériques, qui constituent pourtant la visée du comparatisme.

Nous sommes parvenus à dégager quatre principes structurant l'action des enseignants, qui apparaissent dans plusieurs des contextes observés : le PS1 valorise les « idées premières » des élèves, c'est-à-dire les rapports qu'ils entretiennent vis-à-vis de certains objets du milieu, avant tout geste d'enseignement à leur propos ; selon le PS2, les éléments de modélisation constituent les buts de l'activité d'enseignement et peuvent être inférés par généralisation à partir des données de l'expérience ; selon le PS3, le savoir se construit en mettant en tension des éléments de modélisation fournis (au moins partiellement) aux élèves et des observables empiriques ; selon le PS4, l'élémentarisation de l'activité scientifique produit des « compétences », qui permettent de dégager des objectifs d'apprentissage et qui pilotent le format des tâches proposées aux élèves. A leur égard, plusieurs pistes d'approfondissement pourraient être explorées dans un prolongement de nos travaux : au-delà d'une investigation plus fine des liens entre principes structurants, schémas d'action des enseignants, et continuité de l'expérience d'apprentissage du point de vue des élèves, il nous semblerait intéressant d'analyser comment les principes structurants peuvent se renforcer mutuellement, ou au contraire, comment l'existence d'un principe structurant peut atténuer la portée d'un autre, etc. Il est ainsi possible de suspecter un certain manque de compatibilité entre la promotion des idées premières comme fondation des séquences d'enseignement (PS1) et l'introduction des élèves à certains éléments de modélisation avant toute investigation subséquente (PS3).

Enfin, nous avons établi la difficulté pour l'enseignant de négocier les rapports que les élèves construisent face à des situations peu contraintes. Les raisons de cette difficulté résident dans le fait que les rapports aux objets construits par les élèves sont dispersés, contingents, souvent infructueux et difficiles à corroborer ou contredire par le biais de protocoles expérimentaux, d'une part et que l'enseignant possède peu de ressources pour exploiter ces rapports aux objets, d'autre part. Inversement, nous avons établi que des situations contraintes (par des éléments de modélisation fournis aux élèves, par exemple) autorisent une certaine continuité puisque les rapports aux objets construits par les élèves peuvent s'insérer dans des formes de négociations (contradiction, corroboration) mises en œuvre par l'enseignant. Si les situations contraintes autorisent une continuité, elles ne la garantissent pas pour autant ; nous avons indiqué, par

exemple, que les éléments de modèles devaient répondre à certains critères, notamment au niveau de la possibilité de leur prise en main immédiate par les élèves. Le domaine de validité de cette conclusion reste à explorer : existe-t-il des « modèles précurseurs » dans d'autres domaines que les propriétés de la matière ou la mécanique ? Comment les construire, à partir de la connaissance des enjeux de savoir propre à une thématique donnée ? Sur ce plan, nous faisons l'hypothèse d'une sensibilité extrême de la structure des « modèles précurseurs » vis-à-vis des objets de savoir en jeu, d'une part et des rapports que les élèves entretiennent déjà aux objets du modèle, du fait de leur existence dans d'autres institutions que l'institution scolaire, d'autre part. En sciences, les « contraintes » fournies aux élèves pour construire de nouveaux rapports aux objets sont-elles toujours de même nature, c'est-à-dire des éléments de modèle ? Il est aisé d'imaginer l'inanité d'introduire directement des éléments de modèle à des élèves très jeunes, qui entrent dans une culture scientifique. Peut-on alors envisager d'autres contraintes qui permettent de modéliser les rapports que les élèves établissent aux objets de la situation, telles la constitution d'un référent empirique qui permettrait à tous de s'y appuyer ?

C'est en raison de toutes ces questions, non explorées dans la thèse mais qui pourraient faire l'objet de recherches futures, que nous avons fait le choix de parler de « contrainte », terme suffisamment indistinct pour laisser l'espace à une exploration de la nature de ces « contraintes » en fonction du niveau des élèves, des objets de savoir en jeu, etc. Dans tous les cas, le succès de ces « contraintes » se mesure à l'aune de la capacité de prise en compte et de négociation des rapports construits par les élèves par l'enseignant afin de les faire évoluer à travers des ajustements qui les déplacent progressivement vers les savoirs visés.

BIBLIOGRAPHIE

- Amade-Escot, C. & Venturini, P. (2009). Le milieu didactique : d'une étude empirique en contexte difficile à une réflexion sur le concept. *Éducation et didactique*, 3(1), 7-43.
- Anderson R.D. (2002). Reforming Science Teaching: What research says about inquiry. *Journal of Science Teacher Education*, 13, 1-12.
- Artigue, M. (2002). Ingénierie didactique: Quel rôle dans la recherche didactique aujourd'hui ? *Revue Internationale des Sciences de l'Éducation*, 8, 59-72.
- Assude, T. & Mercier, A. (2007). L'action conjointe professeur-élève dans un système didactique orienté vers les mathématiques. In G. Sensevy & A. Mercier (ed). *Agir ensemble. L'action didactique conjointe du professeur et des élèves*, pp. 153-185. Rennes : Presses Universitaires.
- Astolfi, J-P. (1992a). Apprendre par franchissement d'obstacles ? *Repères*, 5, 103-116.
- Astolfi J.-P. (1992b). *L'École pour apprendre*. Paris : ESF.
- Bachelard, G. (2000). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris : Librairie J Vrin.
- Bachelard S. (1979). Quelques aspects historiques des notions de modèle et de justification des modèles. In P. Delattre & M. Thellier, *Élaboration et justification des modèles*. Paris : Maloine.
- Bächtold, M. (2012). Les fondements constructivistes de l'enseignement des sciences basé sur l'investigation. *Tréma*, 38, 7-39.
- Bar, V., & Galili, I. (1994). Stages of children's views about evaporation. *International Journal of Science Education*, 16, 157-174.
- Bar, V., & Travis, A. S. (1991). Children's views concerning phase changes. *Journal of Research in Science Teaching*, 28, 363-382.
- Ben-Zvi, R., Eylon, B. S., & Silberstein, J. (1986). Is an atom of copper malleable? *Journal of Chemical Education*, 63(1), 64-66.
- Bernard, C. (1865). *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*. J. B. Baillière et fils.
- Brooks, A., Briggs, M., & Driver, R. (1984). *Aspects of secondary students' understanding of the particulate nature of matter*. Leeds : Children's Learning in Science Project. Center for Studies in Science and Mathematics Education. University of Leeds

- Brousseau G. (1980a). Les échecs électifs en mathématiques dans l'enseignement élémentaire. *Revue de Laryngologie*, 101(34), 107-131.
- Brousseau, G. (1980b). L'échec et le contrat. *Recherches*, 41, 177-182.
- Brousseau G., (1986). Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 7(2), 33-115. Grenoble : ed. La Pensée Sauvage.
- Brousseau G. (1990). Le contrat didactique: le milieu. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 9 (3), 309-336. Grenoble : La Pensée Sauvage.
- Brousseau G. (1998). Glossaire de quelques concepts de la théorie des situations didactiques en mathématiques. Consulté le 11 janvier 2018 sur http://guy-brousseau.com/wp-content/uploads/2010/09/Glossaire_V5.pdf. Réédition 2010.
- Brousseau, G. (2004). L'émergence d'une science de la didactique des mathématiques. *Repère IREM*, 55, 19-34.
- Brousseau, G. (2011). La théorie des situations didactiques en mathématiques. *Éducation et didactique*, 5(1), 1-7.
- Buisson, F. (2012). *Le Nouveau Dictionnaire de Pédagogie et d'instruction primaire*. Paris : Théolib. Consulté sur <http://www.inrp.fr/edition-electronique/lodel/dictionnaire-ferdinand-buisson/> le 22 décembre 2017.
- Bunge, M. (1975). *Philosophie de la physique*. Paris : Editions du Seuil.
- Caillot, M. (1996) La théorie de la transposition didactique est-elle transposable ?, in Raïsky, C. et Caillot, M. (dir.), *Au-delà des didactiques, le didactique. Débats autour de concepts fédérateurs* (pp. 19-35). Bruxelles : De Boeck.
- Calmettes, B. (dir). (2012). *Recherches en didactique et démarches d'investigations dans les disciplines scientifiques*. Paris : L'Harmattan.
- Carette, V.& Rey B. (2010). *Savoir enseigner dans le secondaire. Didactique générale*. Bruxelles : De Boeck.
- Carey, S. (1985). *Conceptual change in childhood*. Cambridge, Mass: MIT Press
- Cariou J.-Y. (2010). Les opinions vulnérables, tremplin vers le savoir. *Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies*, 1, 67-92.
- Cariou, J.Y. (2011). Histoire des démarches en sciences et épistémologie scolaire. *Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies*, 3, 83-106.

- Chalmers, A. F. (1976/1982). *Qu'est-ce que la science ?* Paris : La Découverte (trad. 1987).
- Chang J. Y., (1999), Teacher college students' conceptions about evaporation, condensation, and boiling, *Science Education*, 83, 511-526.
- Chevallard, Y. (1985). *La transposition didactique*. Grenoble : La pensée sauvage. Réédition 1991.
- Chevallard, Y. (1986). Les programmes et la transposition didactique - Illusions, contraintes et possibles. *Bulletin de l'APMEP*, 352, 32-50.
- Chevallard, Y. (1988). Médiations et individuation didactiques. Actes du Premier Colloque Médiation et Remédiation Didactiques organisé par le Centre d'Observation et d'Expérimentation Didactiques (23-34). *Interactions didactiques*, 8. Universités de Neuchâtel et Genève.
- Chevallard, Y. (1989). Le concept de rapport au savoir. Rapport personnel, rapport institutionnel, rapport officiel. Document interne.
- Chevallard, Y. (1992). Concepts fondamentaux de la didactique : perspectives apportées par une approche anthropologique. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 12(1), 73-112.
- Chevallard, Y. (1994). Les processus de transpositions didactique et leur théorisation. In *La Transposition didactique à l'épreuve des faits*. Grenoble : La Pensée Sauvage.
- Chevallard, Y. (1999). L'analyse des pratiques enseignantes en théorie anthropologique du didactique. *Recherches en didactique des mathématiques*, 19(2), 221-266.
- Chevallard, Y. (2002). Organiser l'étude. Ecologie et régulation. In J.-L. Dorier, M. Artaud, M. Artigue, R. Berthelot, R. Floris (dir.) *Actes de la XIème Ecole d'été de didactique des mathématiques, Corps* (pp. 41-56). Grenoble : La Pensée Sauvage
- Chevallard, Y. (2003). Approche anthropologique du rapport au savoir et didactique des mathématiques. In S. Maury S. & M. Caillot (éds), *Rapport au savoir et didactiques* (pp. 81-104). Paris : Editions Fabert.
- Chevallard, Y. (2007). Passé et présent de la théorie anthropologique du didactique. Conférence plénière au premier congrès international sur la théorie anthropologique du didactique. In L. Ruiz-Higueras, A. Estepa, & F. Javier García (Eds.), *Sociedad, Escuela y Matemáticas. Aportaciones de la Teoría Antropológica de la Didáctica* (pp. 705-746). Universidad de Jaén.
- Chomat, A., Larcher, C., & Meheut, M. (1988). Modèle particulière et activités de modélisation en classe de quatrième. *Aster*, 7, 143-184.

- Coştu, B., & Ayas, A. (2005). Evaporation in different liquids: Secondary students' conceptions. *Research in Science & Technological Education*, 23(1), 75-97.
- Develay M. (1989). Sur la méthode expérimentale. *Aster*, 8, 1-15.
- Dubois, P. (2002). *Le Dictionnaire de Ferdinand Buisson. Aux fondations de l'école républicaine (1878- 1991)*. Berne: Peter Lang.
- Duhem, P. (1906). *La théorie physique, son objet et sa structure*. Paris : Vrin (réed. 1997).
- Eliard, M. (1993). Sociologie et éducation. De Condorcet à Durkheim. *Revue française de pédagogie*, 104, 55-60.
- Feyerabend, P. (1979). *Contre la méthode*. Paris : Éditions du Seuil.
- Feyerabend, P. (2014). *La Tyrannie de la science*. Paris : Éditions du Seuil.
- Gaidioz P., Vince J., & Tiberghien A. (2004). Aider l'élève à comprendre le fonctionnement de la physique et son articulation avec la vie quotidienne. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 98 (866), 1029-1042.
- Genzling, J.-C. (1988). Les modèles particuliers. *Aster*, 7, 53-70.
- Gil-Perez, D. (1993). Apprendre les sciences par une démarche de recherche scientifique. *Aster*, 17, 41-64.
- Giordan, A. (1976). *Rien ne sert de courir, il faut partir à point*. Thèse de doctorat de l'université Paris V et Paris VII.
- Giordan, A. (1999). *Une didactique pour les sciences expérimentales*. Paris : Belin.
- Gohau G. (1987). Difficultés d'une pédagogie de la découverte dans l'enseignement des sciences. *Aster*, 5, 49-69.
- Griffiths, A. K., & Preston, A. K. (1992). Grade-12 students' misconceptions relating to fundamental characteristics of atoms and molecules. *Journal of Research in Science Teaching*, 29, 611-628.
- Gyllenpalm, J., & Wickman, P.-O. (2011). "Experiments" and the inquiry emphasis conflation in science teacher education. *Science Education*, 95(5), 908-926.
- Hacking, I. (1983). *Representing and intervening: introductory topics in the philosophy of natural science*. New York: Cambridge University Press.

- Halloun I. A. & Hestenes D. (1985). Common-sense concepts about motion. *American Journal of Physics*, 53, 1056-1065.
- Hamza, K. M., & Wickman, P.-O. (2009). Beyond explanations: What else do students need to understand science? *Science Education*, 93, 1-24.
- Hofstetter, R. (1998). *Les lumières de la démocratie : histoire de l'école primaire publique primaire à Genève au XIXe siècle*. Berne : P.Lang.
- Hofstetter, R., & Perisset Bagnoud, D. (1998). L'école de la démocratie: "Education 'nationale' " ou "Instruction publique"? Les projets pédagogiques de Genève et du Valais (1838-1874) questionnés à partir du modèle théorique de Condorcet. *Education Et Recherche*, 20(3), 402-418.
- Holgersson, I., & Löfgren, L. (2004). A long-term study of students' explanations of transformations of matter. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, 4(1), 77-96
- Hoquet, T. (2015, 7 avril). Paul Feyerabend, anarchiste des sciences. La Vie des idées. Consulté le 27 septembre 2017 à <http://www.laviedesidees.fr/Paul-Feyerabend-anarchiste-des-sciences.html>.
- Irzik, G. & Nola, R. (2011). A Family Resemblance Approach to the Nature of Science for Science Education. *Science & Education*, 20(7-8), 591-607.
- Johnson, P.M. (1998a). Children's understanding of changes of state involving the gas state. Part 1: Boiling water and the particle theory. *International Journal of Science Education*, 20(5), 567-583.
- Johnson, P.M. (1998b) Children's understanding of changes of state involving the gas state. Part 2: evaporation and condensation below boiling point. *International Journal of Science Education*, 20(6), 695-709.
- Johnson, P.M. (1998c). Progression in children's understanding of a 'basic' particle theory: A longitudinal study. *International Journal of Science Education*, 20(4), 393-412.
- Johsua, S. (1988). Le « contrat didactique » et l'analyse des phénomènes didactiques. Actes du Premier Colloque Médiation et Remédiation Didactiques organisé par le Centre d'Observation et d'Expérimentation Didactiques (35-44). *Interactions didactiques*, 8. Universités de Neuchâtel et Genève.
- Johsua, S. (1989). Le rapport à l'expérimental dans la physique de l'enseignement secondaire. *Aster*, 8, 29-54.

- Johsua, S. (1996). Le concept de transposition didactique n'est-il propre qu'aux mathématiques ? In Raisky, C. et Caillot, M. (1996) *Au-delà des didactiques, le didactique ; débats autour de concepts fédérateurs* (pp. 61-73). Bruxelles : De Boeck Université.
- Johsua, S., & Dupin, J.-J. (1986). Is the systematization of hypothetico-deductive reasoning possible in a class situation? *European Journal of Science Education*, 8(4), 381-388.
- Kahn, P. (2000). L'enseignement des sciences, de Ferry à l'éveil. *Aster*, 31, 9-35.
- Kintzler C. (1984). *Condorcet, l'instruction publique et la naissance du citoyen*. Paris : Gallimard.
- Kirbulut, Z. D., & Beeth, M. E. (2013). Consistency of Students' Ideas across Evaporation, Condensation, and Boiling. *Research in Science Education*, 43(1), 209-232.
- Kirschner, P. A., Sweller, J., & Clark, R. E. (2006). Why minimal guidance during instruction does not work: An analysis of the failure of constructivist, discovery, problem-based, experiential, and inquiry-based teaching. *Educational psychologist*, 41(2), 75-86.
- Kokkotas, P., Vlachos, I., & Koulaidis, V. (1998). Teaching the topic of the particulate nature of matter in prospective teachers' training courses. *International Journal of Science Education*, 20(3), 291-303.
- Krnel, D., Watson, R. and Glazar, S. A. (1998). Survey of research related to the development of the concept of 'matter'. *International Journal of Science Education*, 20(3), 257-289.
- Kuhn, T. S. (1959). La tension essentielle : tradition et innovation dans la recherche scientifique. In P. Jacob (Ed.), *De Vienne à Cambridge, l'héritage du positivisme logique* (pp. 303 – 320). Paris : Gallimard.
- Kuhn, T. S. (1962). *La structure des révolutions scientifiques*. Paris: Flammarion (trad. 1970, rééd. 1983).
- Kuhn, T. S. (1977). *The essential tension*. Chicago: University of Chicago Press.
- Lakatos, I. (1970). Falsification and the methodology of scientific research programmes. In I. Lakatos, & A. Musgrave (Ed), *Criticism and the growth of knowledge* (pp. 91-195). Cambridge: Cambridge University Press.
- Lakatos, I. (1994). *Histoire et Méthodologie des sciences*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Larcher, C., Chomat, A., & Méheut, M. (1990). A la recherche d'une stratégie pédagogique pour modéliser la matière dans ses différents états. *Revue française de pédagogie*, 93(1), 51-61.
- Laval, A. (1985). Chaleur, température, changements d'état. *Aster*, 1, 115-132.

- Lederman, N. (2004). Syntax of Nature of science within inquiry and science instruction. In Flick, L. & Lederman, N. (Eds.), *Scientific Inquiry and Nature of Science* (pp. 301-317). Kluwer Academic Publishers.
- Lederman, N.G., Abd-El-Khalick, F., Bell, R.L., & Schwartz, R. (2002). Views of nature of science questionnaire (VNOS): Toward valid and meaningful assessment of learners' conceptions of nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 39(6), 497-521.
- Lee, O., Eichinger, D. C., Anderson, C. W., Berkheimer, G. D. & Blakeslee, T. D. (1993). Changing middle school students' conceptions of matter and molecules. *Journal of Research in Science Teaching*, 30(3), 249-270.
- Lelièvre, C (2002). Jules Ferry, des repères brouillés. *Communications*, 72, 141-158.
- Lemeignan, G. & Weil-Barais, M. (1993). *Construire des concepts en physique : l'enseignement de la mécanique*. Paris : Hachette.
- Lemke, J. L. (2001). The Long and the Short of It: Comments on Multiple Timescale Studies of Human Activity. *The Journal of the Learning Sciences*, 10(1/2), 17-26.
- Leutenegger, F. (2000). Construction d'une "clinique" pour le didactique. Une étude des phénomènes temporels de l'enseignement. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 20 (2), 209-250.
- Leutenegger, F. (2003). Etude des interactions didactiques en classe de mathématiques : un prototype méthodologique. In A. Danis, M.-L. Schubauer-Leoni & A. Weil-Barais (Eds.), Interaction, Acquisition de connaissances et Développement. *Bulletin de Psychologie*, 56(4), 466, 559-571.
- Leutenegger F. (2009) *Le temps d'instruire. Approche clinique et expérimentale du didactique ordinaire en mathématiques*. Bruxelles : Peter Lang.
- Ligozat, F. (2008). *Étude de l'action conjointe du professeur et des élèves à propos de l'enseignement /apprentissage de la mesure des grandeurs dans des classes françaises et suisses romandes*. Thèse de doctorat en Sciences de l'Education. Université de Genève & Université d'Aix-Marseille.
- Ligozat, F. (2009). De la tâche mathématique prescrite à la tâche effectivement réalisée en classe : un double feuilleté d'analyse pour l'étude du didactique ordinaire. In S. Canelas-Trevisi (Ed.). *Outils d'analyse de l'objet enseigné en didactique* (pp. 233 -250). Grenoble: ELLUG.
- Ligozat, F. (2010). Les textes de l'activité mathématique scolaire. Préconstruits et ressources dans la genèse des formes de l'action didactique. In G. Gueudet & L. Trouche. Ressources Vives.

Le travail documentaire des professeurs de mathématiques (pp. 303-320). Rennes & Lyon : PUR & INRP.

Ligozat, F. (2014). Teaching and Learning as Didactic Joint Action. Paper presented in Symposium « Sharing Ideas for Passionate, Radical and Innovative Approaches to Didactics, Teaching and Learning (Part 1): Action, Practice and Space ». Coord. C. Taylor. Présenté à *European Congress on Educational Research ECER (1-5 sept.)*, Porto. Consulté à l'adresse <http://www.eera-ecer.de/ecer-programmes/conference/19/contribution/33441/>

Ligozat, F. (2015) L'analyse didactique des pratiques de classe : outils et démarches d'identification des logiques d'action enseignantes en mathématiques. *Formation et pratiques d'enseignement en questions*, 18, 17-37.

Ligozat, F. (2016) Didactique comparée : quels enjeux pour la construction d'un champ de recherches en didactique ? Une étude de cas en classe de français. In Matheron, Y., et al. *Enjeux et débats de didactique des mathématiques. XVIIIème Ecole d'été de didactique des mathématiques*. Grenoble : La Pensée Sauvage Edition.

Ligozat, F. (en preparation pour le congrès international sur la théorie de l'action conjointe en didactique, Rennes, juin 2019). Le "triplet de genèses" dans l'analyse de l'action didactique conjointe : (re) construction théorique et mise à l'épreuve.

Ligozat, F. & Leutenegger, F. (2008). Construction de la référence et milieux différentiels dans l'action conjointe du professeur et des élèves. Le cas d'un problème d'agrandissement de distances. *Recherches en didactique des mathématiques*, 28(3), 319-378

Ligozat, F. & Leutenegger, F. (en préparation). *L'exercice comparatiste en didactique. Recherches dans les contextes éducatifs suisse romands*

Ligozat, F., Lundqvist, E., & Amade-Escot, C. (2018). Analysing the continuity of teaching and learning in classroom actions: When the joint action framework in didactics meets the pragmatist approach to classroom discourses. *European Educational Research Journal*, 17(1), 147–169.

Ligozat, Monge & Marty (en preparation). L'articulation de l'analyse a priori et de l'analyse ascendante de la transposition dans l'observation de leçons sur les changements d'état en physique.

Ligozat F, Wickman P-O., Hamza K. (2011). Using Practical Epistemology Analysis to Study the Teacher and Students' Joint Actions in the Mathematics Classroom. In: Pytlak, M.; Swoboda, E. & Rowland, T. *Proceedings of the 7th Congress of the European society for Research in Mathematics Education (CERME 7)*. University of Rzeszow (Poland). p. 2472-2481.

- Luc, C. (2004) Réactions et raisonnements des élèves devant une expérience sur les propriétés pressantes et élastiques de l'air. *BUP*, 98, 551-566
- Marcel, J.F., Olry, P., Rothier-Bautzer, E. & Sonntag, M. (2002). Les pratiques comme objet d'analyse. Note de synthèse. *Revue Française de Pédagogie*, 138(1), 135-170.
- Marlot, C., & Morge, L. (2015). Des normes professionnelles à caractère doxique aux difficultés de mise en œuvre de séquences d'investigation en classes de sciences : comprendre les déterminations de l'action. *Recherches En Éducation*, 21, 123-137.
- Marlot, C., & Morge, L. (2016). *L'investigation scientifique et technologique : Comprendre les difficultés de mise en oeuvre pour mieux les réduire*. Rennes : PUR.
- Marlot, C., & Toullec-Théry, M. (2014). Normes professionnelles et épistémologie pratique de l'enseignant: un point de vue didactique. *Revue canadienne de l'éducation (RCE) / Canadian Journal of Education (CJE)*, 37(4).
- Martinand, J.-L. (1986). *Connaître et transformer la matière: des objectifs pour l'initiation aux sciences et techniques*. Berne ; New York: P. Lang.
- Marty, L. & Ligozat F. (accepté). Une lecture du plan d'études romand au sujet de l'enseignement des sciences physiques à la lumière d'une comparaison Suisse romande – France. *Formation et pratiques d'enseignement en questions (revue des HEP)*
- Marty, L., Ligozat F. & Venturini P. (2016). Etude de la construction de la référence commune en sciences physiques au collège lors de deux activités conçues selon une conception particulière de l'approche par compétences. *Communication orale au neuvièmes Rencontres Scientifiques de l'Association pour la Recherche en Didactique des Sciences et des Technologies (ARDIST)*. Université d'Artois, Lens, France, 30 mars-1ier avril.
- Marty L., Venturini P. & Almqvist J. (2018). Teaching Traditions in Science Education in Switzerland, Sweden and France : a comparative analysis of three curricula. *European Educational Research Journal*, 42 (1), 155 - 163.
- Mathé S., Méheut M. & De Hosson C. (2008). Démarche d'investigation au collège : quels enjeux ? *Didaskalia*, 32, p. 41-76.
- Méheut M. (1996). Enseignement d'un modèle particulière cinétique de gaz au collège. *Didaskalia*, 8, 7-32.
- Méheut M. & Chomat A. (1990). Les limites de l'atomisme enfantin ; expérimentation d'une démarche d'élaboration d'un modèle par des élèves de collège. *European Journal of Psychology of Education*, 5, 417-437.

- Mercier A., Schubauer-Leoni M.-L., Sensevy G. (2002). Vers une didactique comparée. *Revue française de pédagogie*, 141, 5-16.
- Morge, L. (2003). Les connaissances professionnelles locales: le cas d'une séance sur le modèle particulaire. *Didaskalia*, 23, 101-131.
- Newton I. (1713). *De Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, [trad. M. F. Biarnais]. Paris : Christian Bourgois, rééd. 1985.
- Novak, J.D., & Musonda, D. (1991). A twelve-year longitudinal study of science concept learning. *American Educational Research Journal*, 25(1), 117-153.
- Novick, S. & Nussbaum, J. (1978). Junior high school pupils understanding of the particulate nature of matter : An interview study. *Science Education*, 63 (3), 273-281.
- Orange, C. (2007). Quel milieu pour l'apprentissage par problématisation en sciences de la vie et de la terre. *Education & Didactique*, 1(2), 37-56
- Osborne, R. and Cosgrove, M. (1983). Children's conceptions of the changes of state of water. *Journal of Research in Science Teaching*, 20(9), 825-838.
- Paik, S. (2015). Exploring the role of a discrepant event in changing the conceptions of evaporation and boiling in elementary school students. *Chemical Education Research and Practice*, 16, 670-679.
- Papageorgiou, G. & Johnson, P. (2005). Do particle ideas help or hinder pupils' understanding of phenomena? *International Journal of Science Education*, 27(11), 1299-1317.
- Papageorgiou G., Stamovlasis D. and Johnston P. (2010). Primary teachers' particle ideas and explanations of physical phenomena: the effect of an in-service training course. *International Journal of Science Education*, 32(5), 629-652.
- Piaget, J., & Inhelder, B. (1941). *Le développement des quantités chez l'enfant*. Oxford, England: Delachaux & Niestle.
- Pélissier, L., & Venturini, P. (2016). Analyse praxéologique de l'enseignement de l'épistémologie de la physique : le cas de la notion de modèle. *Education & Didactique*, 10(2), 63-90.
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66, 211-227.
- Prain, V., Tytler, R., & Peterson, S. (2009). Multiple representations in learning about evaporation. *International Journal of Science Education*, 31(6), 787-808.

- Quine, W. V. (1951). Main Trends in Recent Philosophy: Two Dogmas of Empiricism. *The Philosophical Review*, 60(1), 20-43.
- Robardet, G. (2001). Quelle démarche expérimentale en classe de physique ? Notion de situation-problème. *Bulletin de l'Union de Physiciens*, 836, 1173-1190.
- Robardet, G. & Guillaud, J.-G. (1995). *Éléments d'épistémologie et de didactique des sciences physiques : de la recherche à la pratique*. Grenoble : Publications de l'IUFM de Grenoble.
- Roux, S. (2007). *La fonction des expériences*. Cours d'épistémologie des sciences physiques, Université Grenoble II. Disponible sur : http://disoama.free.fr/L1_05_ep_4.pdf
- Rowlands, S., Graham, T., Berry, J. and McWilliam, P. (2007). Conceptual change through the lens of Newtonian mechanics. *Science & Education*, 16, 21-42.
- Sarrazy B. (1995). Le contrat didactique. *Revue française de pédagogie*, 112, 5-118.
- Schneuwly, B. (2011). Subject didactics: An academic field related to the teacher profession and teacher education. In B. Hudson & M. A. Meyer (Eds.), *Beyond fragmentation: Didactics, learning and teaching in Europe* (pp. 275–286). Opladen & Farmington Hills, MI: Barbara Budrich Publishers.
- Schneuwly, B. & Dolz, J. (2009). *Des objets enseignés en classe de français*. Rennes : PUR.
- Schneuwly, B., Dolz, J., & Ronveaux, C. (2006). Le synopsis : un outil pour analyser les objets enseignés. In M.-J. Perrin-Glorian & Y. Reuter (dir.), *Les méthodes de recherche en didactiques* (pp. 175-189). Villeneuve d'Ascq: Presses Universitaires du Septentrion.
- Schubauer-Leoni, M.-L. (1988). Le contrat didactique dans une approche psycho-sociale des situations d'enseignement. Actes du Premier Colloque Médiation et Remédiation Didactiques organisé par le Centre d'Observation et d'Expérimentation Didactiques (63-77). *Interactions didactiques*, 8. Universités de Neuchâtel et Genève.
- Schubauer-Leoni, M.-L. (1998). Les sciences didactiques parmi les sciences de l'éducation: l'étude du projet scientifique de la didactique des mathématiques. In R. Hofstetter & B. Schneuwly (Ed.), *Le pari des sciences de l'éducation* (pp. 329-352). Bruxelles: De Boeck. Coll. Raisons Educatives.
- Schubauer-Leoni, M.-L. (2002). L'analyse de la tâche dans une approche de didactique comparée. Introduction à la problématique du symposium. In J. Dolz, B. Schneuwly, T. Thevenaz-Christen, & M. Wirthner (Éd.), *Actes du 8e Colloque international de la DFLM [26-28 sept. 2011]*. Neuchatel: DFLM / AIRDF.

- Schubauer-Leoni, M.-L. (2008). Entrée « Didactique ». In A. Van Zanten (dir.), *Dictionnaire de l'éducation*. Paris : PUF.
- Schubauer-Leoni, M. L. & Leutenegger, F. (2002). Expliquer et comprendre dans une approche clinique/expérimentale du didactique d'ordinaire. In F. Leutenegger & M. Saada-Robert (Eds.), *Expliquer et comprendre en Sciences de l'éducation* (pp.227-252). Bruxelles: De Boeck. Coll. Raisons Educatives.
- Schubauer-Leoni, M.-L. & Leutenegger, F. (2005). Une relecture des phénomènes transpositifs à la lumière de la didactique comparée. *Revue suisse des sciences de l'éducation*, 27(3), 407-429.
- Schubauer-Leoni, M.-L. & Leutenegger, F. (2009). Implicites dans l'étude des processus transpositifs : comparaison de textes officiels pour l'enseignement des mathématiques et du français dans les premières années de scolarité. In C. Cohen-Azria & N. Sayac (Éd.), *Questionner l'implicite. Les méthodes de recherche en didactique* (pp.243-260). Villeneuve-d'Ascq : Presses universitaires du Septentrion.
- Schubauer-Leoni, M.-L., Leutenegger, F., Ligozat, F., Fluckiger, A. (2007). Un modèle de l'action conjointe professeur-élèves: les phénomènes didactiques qu'il peut/doit traiter. In G. Sensevy, & A. Mercier (Eds.), *Agir ensemble. L'action didactique conjointe du professeur et des élèves* (pp. 51-91). Presses Universitaires de Rennes.
- Sensevy, G. (2007). Des catégories pour décrire et comprendre l'action didactique. In G. Sensevy & A. Mercier (Eds.), *Agir ensemble : Éléments de théorisation de l'action conjointe du professeur et des élèves* (pp. 13-49). Rennes: Presses Universitaires de Rennes.
- Sensevy, G. (2013). Filmer la pratique. Un point de vue de la théorie de l'action conjointe en didactique. In L. Veillard, & A. Tiberghien (Eds.), *Instrumentation de la recherche en Education. Le cas du développement d'une base de vidéos de situation d'enseignement et d'apprentissage ViSA*. Paris: Éditions de la Maison des Sciences de l'Homme.
- Sensevy, G. & Ligozat, F. (2017). Didactique comparée et didactique générale. In A. Van Zanten & P. Rayou. *Dictionnaire de l'éducation et de la formation* (2nd Ed.). Paris : PUF.
- Sensevy & A. Mercier (Eds.) (2007). *Agir ensemble : Éléments de théorisation de l'action conjointe du professeur et des élèves*. Rennes : Presses Universitaires de Rennes.
- Sensevy, G., Mercier, A., Schubauer-Leoni, M.-L. (2000). Vers un modèle de l'action didactique du professeur : à propos de la Course à 20. *Recherches en Didactique des mathématiques*, 20(3), 263-304
- Sensevy, G., & Quilio, S. (2002). Les discours du professeur. Vers une pragmatique didactique. *Revue Française de Pédagogie*, 141, 47-56.

- Séré, M.-G. (1992). Guider le raisonnement d'élèves de collège avec des modèles particuliers de la matière. *Aster*, 14, 77-102.
- Séré M.-G., & Tiberghien A. (1989). La formation des concepts décrivant les états de la matière au collège. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 716, 911-930.
- Séré, M. G., & Weil-Barais, A (1988). Nouvelle approche de la conservation des grandeurs physiques: Etude transversale de la conservation de la quantité de gaz auprès d'élèves de 11 à 15 ans. *Enfance*, 41, 21-37.
- Shulman, L. S. (1986). Those who understand: Knowledge growth in teaching. *Educational Researcher*, 15, 4-14.
- Soler, L. (2001). Certitudes, incertitudes et enjeux de la philosophie des sciences contemporaine. *Le Portique-Revue de philosophie et de sciences humaines*, 7. Consulté à l'adresse <https://leportique.revues.org/236>
- Soler, L. (2009). *Introduction à l'épistémologie*. Paris: Ellipses.
- Stavy, R. (1990). Children's conception of changes in state of matter: From liquid (or solid) to gas. *Journal of Research in Science Teaching*, 27(3), 247-266.
- Stavy, R. and Stachel, D. (1985). Children's ideas about 'solid' and 'liquid'. *European Journal of Science Education*, 7, 407-421.
- Thevenaz-Christen, T. (2002). Milieu didactique et travail de l'élève dans une interaction maître-élève : apprendre à expliquer une règle de jeu à l'école enfantine genevoise. In P. Venturini, C. Amade-Escot, & A. Terrisse (Eds.), *Etude des pratiques effectives : l'approche des Didactiques* (pp. 47-70). Grenoble : La pensée sauvage.
- Tiberghien A. (1994). Modelling as a basis for analyzing teaching-learning situations. *Learning and instruction*, 4(1), 71-87.
- Tiberghien A., Malkoun L. & Seck M. (2008). Analyse des pratiques de classes de physique : aspects théoriques et méthodologiques. *Les Dossiers des sciences de l'éducation*, 19, 61-79.
- Tiberghien, A. & Venturini P. (2016). Contrat didactique dans une séquence de physique et échelles de temps: comparaison selon l'organisation sociale de la classe. Communication orale au neuvièmes Rencontres Scientifiques de l'Association pour la Recherche en Didactique des Sciences et des Technologies (ARDIST). Université d'Artois, Lens, France, 30 mars-1ier avril. Consulté le 8 novembre 2018 à <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01443069/document>

- Tiberghien, A. & Vince, J. (2005). Etude de l'activité des élèves de lycée en situation d'enseignement de la physique. *Cahiers du Français Contemporain*, 10, 153-176.
- Tiberghien, A., Vince, J., & Gaidioz, P. (2009). Design-based research: Case of a teaching sequence on mechanics. *International Journal of Science Education*, 31(17), 2275-2314.
- Toulmin, S. E. (1973). *L'explication scientifique*. Paris: Colin.
- Tytler, R. (2000). A comparison of Year 1 and Year 6 students' conceptions of evaporation and condensation: dimensions of conceptual progression. *International Journal of Science Education*, 22(5), 447-467.
- Tytler, R., & Peterson, S. (2001). Deconstructing learning in science: Young children's responses to a classroom sequence on evaporation. *Research in Science Education*, 30(4), 339-355.
- Tytler R., Prain V. and Peterson S. (2007). Representational issues in students' learning about evaporation. *Research in Science Education*, 37, 313-331.
- Veillard, L., Tiberghien A., & Vince J. (2011). Analyse d'une activité de conception collaborative de ressources pour l'enseignement de la physique et la formation des professeurs : le rôle de théories ou outils spécifiques. *Activités*, 8 (2), 202-227.
- Venturini P. & Tiberghien A. (2012a). Potential Learning Outcomes Inferred from French Curricula in Science Education. In S. Bernholt, K. Neumann, & P. Nentwig (dir.), *Making It Tangible - Learning Outcomes in Science Education* (pp. 475-509). Münster : Waxmann.
- Venturini P. & Tiberghien A. (2012b). Mise en œuvre de la démarche d'investigation dans le cadre des nouveaux programmes de sciences physiques et chimiques : étude de cas au collège. *Revue française de pédagogie*, 180, 95-120.
- Vosniadou, S. (1994). Capturing and modelling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4, 45-69.
- Walliser, B. (1977). *Systèmes et modèles: introduction critique à l'analyse de systèmes: essai*. Paris: Editions du Seuil.
- Weil-Barais, A. & Resta-Schweitzer, M. (2008). Approche cognitive et développementale de la médiation en contexte d'enseignement-apprentissage. *La nouvelle revue de l'adaptation et de la scolarisation*, 42 (2), 83-98.
- Wickman, P.-O. (2004). The practical epistemologies of the classroom: A study of laboratory work. *Science Education*, 88, 325-344.

Wootton, D. (2015). *The invention of science: A new history of the scientific revolution*. Penguin : UK.

Textes officiels

France : Ministère de l'Éducation Nationale (2015). Socle commun de connaissances, de compétences et de culture. BO, n° 17 du 23 janvier 2015. Consulté le 29 octobre 2018 sur http://cache.media.education.gouv.fr/file/17/45/6/Socle_commun_de_connaissances_de_competences_et_de_culture_415456.pdf

France : Ministère de l'Éducation Nationale (2012). Ressources en sciences expérimentales et technologie (CE2 - CM1 - CM2). BO, n° 1 du 5 janvier 2012. Consulté sur http://media.education.gouv.fr/file/1/58/7/programmes_ecole-primaire_203587.pdf le 21 décembre 2017.

France : Ministère de l'Éducation Nationale (2008a). Horaires et programmes d'enseignement de l'école primaire (CE2 - CM1 - CM2). BO hors-série, n°3 du 19 juin 2008. Consulté sur http://www.education.gouv.fr/bo/2008/hs3/programme_CE2_CM1_CM2.htm le 21 décembre 2012.

France : Ministère de l'Éducation Nationale (2008b). Programme de Physique-Chimie au collège, BO spécial, n°6 du 28 août 2008. Consulté sur http://media.education.gouv.fr/file/special_6/52/7/Programme_physique-chimie_33527.pdf le 21 décembre 2017.

France : Groupe technique associé au comité de suivi du plan de rénovation des sciences et de la technologie à l'école (2002). Documents d'accompagnement des programmes : Enseigner les sciences à l'école, cycle 3, outil pour la mise en œuvre des programmes 2002. Paris : CNDP, 2002. (1 livre + 1 cédérom). Académie des sciences / MEN. Direction de l'enseignement scolaire (Desco).

France : Ministère de l'Éducation Nationale (2000). Plan de rénovation de l'enseignement des sciences et de la technologie à l'école. BO, n° 23 du 15 juin 2000. Consulté sur <http://www.education.gouv.fr/bo/2000/23/ensel.htm> le 21 décembre 2012.

National Research Council (1996). National science education standards. Washington : National Academy Press. Disponible sur Internet : <http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=4962>

Mathématiques et Sciences de la Nature (MSN) (2011). *Plan d'études romand (PER)*. Neuchâtel: CIIP. Consulté sur <http://www.plandetudes.ch/web/guest/sciences-de-la-nature> le 21 décembre 2017.

Formation générale (FG) (2011). *Plan d'études romand (PER)*. Neuchâtel: CIIP. Consulté le 21 décembre 2017 sur <http://www.plandetudes.ch/web/guest/pg2-fg>

Compétences transversales (CT) (2011). *Plan d'études romand (PER)*. Neuchâtel: CIIP. Consulté le 21 décembre 2017 sur http://www.plandetudes.ch/documents/10273/36379/CT_PER_BROCHURE_PG-6.pdf

Bochet J., Colongo C., Jordan D., Grundisch A. & Robardet G. (2010) Moyens d'enseignement du canton de Genève. Progression du thème « Matière et ses transformations ». Document de travail.

Rapport

Eurydice (éd.), le réseau d'information sur l'éducation en Europe (2006) L'enseignement des sciences dans les établissements scolaires en Europe. Etat des lieux des politiques et de la recherche. Direction générale de l'Education et de la Culture. Commission Européenne.

Rocard M., Csermely P., Jorde D., Lenzen D., Walberg-Henricksson H., Hemmo V. (2007). L'enseignement scientifique aujourd'hui : une pédagogie renouvelée pour l'avenir de l'Europe. Commission Européenne, Direction de la Recherche. Consulté sur http://ec.europa.eu/research/science-society/document_library/pdf_06/report-rocardon-science-education_fr.pdf le 21 décembre 2012.

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Exemple de transcription.....	122
Tableau 2 : Exemple de synopsis « mésoscopique » (relatif à l'enjeu d'apprentissage N1) .	126
Tableau 3 : Exemple de l'analyse d'un extrait significatif.....	131
Tableau 4 : Synopsis de la séquence de la classe d'Amélie.....	150
Tableau 5 : Synopsis de l'enjeu N1 « Introduction de la catégorisation des états de la matière (solide, liquide, gaz) ».....	152
Tableau 6 : Contenu des 20 photographies de l'eau dans la nature que les élèves doivent désigner	153
Tableau 7 : Synopsis de l'enjeu N4 « Etude de l'état gazeux et des propriétés des transitions liquide-gaz pour l'eau ».....	155
Tableau 8 : Synopsis de l'enjeu N5 « Utilisation de la catégorisation des états de la matière pour décrire l'eau dans la nature »	157
Tableau 9 : La dénomination des dix images représentant différents états de l'eau qu'il s'agit de déterminer.....	158
Tableau 10 : Synopsis de la séquence de la classe de Louise	193
Tableau 11 : Synopsis de l'enjeu N2 « Étude des propriétés de la vapeur d'eau, de l'eau liquide, de l'évaporation et de la condensation ».....	194
Tableau 12 : Synopsis de la séquence de la classe d'Esther	230
Tableau 13 : Synopsis de l'enjeu N2 « Étude du phénomène d'évaporation aux échelles macroscopique et microscopique »	231
Tableau 14 : Résumé des connexions entre modèle moléculaire et phénomènes physiques établies depuis le début de l'année.....	237
Tableau 15 : Synopsis de la séquence de Nathan.....	267
Tableau 16 : Synopsis de l'enjeu N6 « Etude des propriétés de l'ébullition des corps purs »	269
Tableau 17 : Mise en correspondance du programme français et du document-maître de la séquence GrandSoif.....	322
Tableau 18 : Répartition des principes structurants dans les quatre classes observées.....	337
Tableau 19 : Résumé du parcours transpositif du terme « hypothèse ».....	351

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Résumé des plans de comparaison de la recherche	7
Figure 2 : Hiérarchie de niveaux de détermination didactique (schéma tiré de Chevallard, 2002).....	39
Figure 3 : Schéma illustrant la transposition de la structure épistémologique de la physique tiré de Tiberghien (2009, p. 2283).....	44
Figure 4 : Schéma illustrant la théorie des deux mondes tiré de Tiberghien (2009, p. 2287)..	45
Figure 5 : Les références épistémologiques et didactiques pour l'enseignement des sciences à l'école obligatoire.....	63
Figure 6 : Extrait du programme français au primaire sur la matière (MEN, 2008a, p. 24)....	87
Figure 7 : Extrait des ressources en sciences au primaire sur la matière (MEN, 2012, p. 3)...	87
Figure 8 : Extrait du tableau à trois colonnes du programme de physique-chimie français (MEN 2008b, p. 17)	91
Figure 9 : Niveaux de généralités associés à quatre capacités tirées du programme physique-chimie 2008	92
Figure 10 : Extrait du PER à propos de la démarche scientifique. Au primaire : à gauche (MSN 26, 2011, p. 33)/Au secondaire : à droite (MSN 36, 2011, p. 39).....	101
Figure 11 : Extrait du PER à propos des propriétés de la matière. Au primaire : à gauche (MSN 26, 2011, p. 37)/Au secondaire : à droite (MSN 36, 2011, p. 41).....	102
Figure 12 : Résumé du dispositif de recherche pour une classe.....	118
Figure 13 : Schéma des données collectées et des strates d'analyse.....	133
Figure 14 : Représentation classique du cycle de l'eau - Tiré de https://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle_de_l'eau	143
Figure 15 : Extrait du PER sur les propriétés de la matière en 6P	159
Figure 16 : Amélie entoure les dénominations communes	164
Figure 17 : Expérience qui a servi de support à l'étude de l'évaporation	172
Figure 18 : L'état de l'eau au TdP 209 avant ébullition.....	173
Figure 19 : L'état de l'eau au TdP 215 pendant l'ébullition	173
Figure 20 : Amélie désigne les volutes blanches qui s'échappent de la bouilloire	174
Figure 21 : Dessin de l'expérience au TN par Amélie	178
Figure 22 : Expérience de modélisation des nuages	178
Figure 23 : Institutionnalisation des propriétés de l'état liquide (extrait du dossier-élève)...	180
Figure 24 : Extrait de la fiche-élève (Tomas) de catégorisation des phénomènes liés à l'eau	182
Figure 25 : Extrait du programme de l'école primaire (MEN, 2008a).....	197
Figure 26 : Extrait des ressources pour l'école élémentaire (MEN, 2012)	197
Figure 27 : Les propositions des élèves à propos du défi Grandsoif.....	199
Figure 28 : Les prévisions des élèves sur le devenir de l'eau laissée à l'air libre.....	199
Figure 29 : Extrait de la feuille que les élèves ont à remplir en fournissant des explications relatives à l'eau disparue	200
Figure 30 : Extrait du document de référence distribué aux élèves relatif à l'évaporation et la condensation.....	201
Figure 31 : Institutionnalisation du modèle moléculaire de l'évaporation.....	232
Figure 32 : Extrait de l'institutionnalisation de l'interprétation microscopique des facteurs d'accélération de l'évaporation	233
Figure 33 : Extrait du PER sur les propriétés de la matière	235
Figure 34 : La fiche distribuée aux élèves (recto à gauche et verso à droite)	238
Figure 35 : La goutte d'eau et d'alcool dessinées au rétroprojecteur par Esther	239

Figure 36 : Représentation des liaisons (traits rouges) des molécules d'un liquide.....	245
Figure 37 : Représentation au rétroprojecteur des deux récipients	252
Figure 38 : Institutionnalisation finale des propriétés de l'ébullition de l'eau pure.....	270
Figure 39 : Extrait du programme de physique-chimie de 5 ^{ième} sur les changements d'état .	272
Figure 40 : Le cycle de l'eau et les états de l'eau dans le cahier des élèves	272
Figure 41 : Extrait de la fiche-méthode « Comment tracer un graphique à partir de données expérimentales ? ».....	273
Figure 42 : Extrait de la fiche-méthode « Comment mesurer la température d'un liquide ? »	273
Figure 43 : La fiche d'hypothèses	274
Figure 44 : Deux allures de graphe pertinentes pour modéliser le phénomène d'ébullition.	276
Figure 45 : La fiche d'étude expérimentale	279
Figure 46 : Ana et Max positionnent le thermomètre	281
Figure 47 : Notation de 90°C comme température d'ébullition sur le tableau de mesures du groupe Ana, Mat, Max	286
Figure 48 : Extrait de la fiche d'évaluation de l'enseignant.....	288
Figure 49 : Notation de la température d'ébullition selon le groupe de Kilian, Mélodie, Daphnée.....	289
Figure 50 : La fiche d'hypothèses de Paul	291
Figure 51 : La fiche d'hypothèses de Max	292
Figure 52 : Le graphe esquissé au tableau.....	301
Figure 53 : En-tête de la fiche d'étude expérimentale de l'ébullition	310
Figure 54 : Extrait du document-maître de la séquence GrandSoif	321
Figure 55 : Extrait du PER (à gauche) et des moyens d'enseignement genevois (à droite) ..	328
Figure 56 : En-tête de la fiche d'étude expérimentale de l'ébullition	331
Figure 57 : La grille de compétences créée par Nathan qui correspond au niveau 5 ^{ième}	334
Figure 58 : Extrait de la « grille de compétences » créée par le groupe de travail de l'académie de Toulouse	335

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	5
CHAPITRE 1 ANALYSE DIDACTIQUE DES PRATIQUES D'ENSEIGNEMENT ET D'APPRENTISSAGE	9
1.1 L'ANALYSE DES PRATIQUES D'ENSEIGNEMENT ET D'APPRENTISSAGE EN DIDACTIQUE : CONCEPTS FONDATEURS	9
1.1.1 LE POINT DE VUE DIDACTIQUE SUR LES PRATIQUES D'ENSEIGNEMENT ET D'APPRENTISSAGE	9
1.1.2 LA TRANSPOSITION DIDACTIQUE	11
1.1.3 LE MILIEU ET LE CONTRAT : DEFINITIONS PREMIERES	16
1.2 LE COMPARATISME EN DIDACTIQUE	20
1.3 L'ETUDE DE L'ACTION CONJOINTE DE L'ENSEIGNANT ET DES ELEVES EN DIDACTIQUE	24
1.3.1 APPORTS DE L'INTERACTIONNISME SOCIAL : UN AGIR DIDACTIQUE CONJOINT	24
1.3.2 UNE APPROCHE PRAGMATISTE – DES RAPPORTS AUX OBJETS ET DES SIGNIFICATIONS	26
1.3.3 RELECTURE DES NOTIONS BROUSSALDIENNES DE CONTRAT ET DE MILIEU A LA LUMIERE DES APPROCHES SOCIO-INTERACTIONNISTE ET PRAGMATISTE	29
1.3.4 LA MODELISATION DE L'ACTION CONJOINTE A L'AIDE DE DIFFERENTS SYSTEMES DE DESCRIPTEURS	32
1.4 L'ANALYSE A PRIORI	36
1.5 LES NIVEAUX DE DETERMINATION DE L'ACTION PROFESSORALE	37
1.6 CONCLUSION	40
CHAPITRE 2 ÉTUDE DES SAVOIRS EPISTEMOLOGIQUES ET DIDACTIQUES RELATIFS A L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES PHYSIQUES A L'ARTICULATION PRIMAIRE-SECONDAIRE	41
2.1 LES SAVOIRS SCIENTIFIQUES ET LEUR TRANSPOSITION	41
2.1.1 LA NATURE DES SAVOIRS SCIENTIFIQUES ET SA TRANSPOSITION	41
2.1.1.1 Théorie, modèle, champ empirique	41
2.1.1.2 Étude de la transposition du triplet {théorie, modèle, champ empirique}	43
2.1.1.3 Conclusion	45
2.1.2 LES MODES D'ELABORATION DES SAVOIRS SCIENTIFIQUES ET LEUR TRANSPOSITION	46
2.1.2.1 L'inductivisme et sa transposition	46
2.1.2.2 La méthode hypothético-déductive et sa transposition	49
2.1.2.3 Les structures de recherche et leur transposition	55
2.1.2.4 L'anarchisme épistémologique et sa transposition	61
2.1.3 CONCLUSION	63
2.2 QUELQUES SAVOIRS EPISTEMOLOGIQUES ET DIDACTIQUES RELATIFS A L'ENSEIGNEMENT DES PROPRIETES DE LA MATIERE	64
2.2.1 LES ETUDES PIAGETIENNES SUR LA (NON)-CONSERVATION DE LA MATIERE	65
2.2.2 LES ETUDES DES CONCEPTIONS ET DU CHANGEMENT CONCEPTUEL	65
2.2.2.1 Les états de la matière	65
2.2.2.2 Les changements d'état	67
2.2.2.3 Les particules et le modèle particulaire de la matière	71
2.2.2.4 Les étapes du changement conceptuel	72
2.2.2.5 Les pratiques d'enseignement et d'apprentissage : angle mort de la théorie du changement conceptuel	73
2.2.3 LES STRATEGIES D'ENSEIGNEMENT A PROPOS DES MODELES PARTICULAIRES	74

2.2.4	LES CONNAISSANCES DES ENSEIGNANTS A PROPOS DES ETATS ET DES CHANGEMENTS D'ETAT	76
2.3	POSITIONNEMENT ET CONCLUSION	77

CHAPITRE 3 ÉTUDE DES CONTEXTES INSTITUTIONNELS DE L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES PHYSIQUES EN FRANCE ET EN SUISSE ROMANDE A L'ARTICULATION PRIMAIRE-SECONDAIRE 83

3.1	L'ENSEIGNEMENT DES SAVOIRS LIES AUX PHENOMENES PHYSIQUES AU PRIMAIRE ET AU SECONDAIRE EN FRANCE	83
3.1.1	ORGANISATION GENERALE DE L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES PHYSIQUES EN FRANCE	83
3.1.2	ANALYSE DES DOCUMENTS INSTITUTIONNELS DE REFERENCE POUR LES SCIENCES PHYSIQUES AU PRIMAIRE ET AU SECONDAIRE INFERIEUR	84
3.1.2.1	Les documents institutionnels de référence spécifiques à l'école primaire	84
3.1.2.2	Le document institutionnel de référence spécifique au secondaire inférieur : Le programme de physique-chimie au collège 2008	88
3.1.3	CONCLUSION	93
3.2	L'ENSEIGNEMENT DES SAVOIRS LIES AUX PHENOMENES PHYSIQUES AU PRIMAIRE ET AU SECONDAIRE EN SUISSE ROMANDE	97
3.2.1	ORGANISATION GENERALE DE L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES PHYSIQUES EN SUISSE ROMANDE	97
3.2.2	ANALYSE DU DOCUMENT INSTITUTIONNEL DE REFERENCE POUR LES SCIENCES PHYSIQUES AU PRIMAIRE ET AU SECONDAIRE INFERIEUR : LE PER 2011	97
3.2.3	CONCLUSION	103
3.3	COMPARAISON INTERINSTITUTIONNELLE DE L'ENSEIGNEMENT DES SAVOIRS LIES AUX PHENOMENES PHYSIQUES EN FRANCE ET EN SUISSE ROMANDE	105
3.3.1	DES CONVERGENCES ENTRE LES CONTEXTES SUISSE-ROMAND ET FRANÇAIS	105
3.3.2	DES SPECIFICITES TRANSPOSITIVES : DEMARCHE D'INVESTIGATION EN FRANCE VS LA MODELISATION EN SUISSE ROMANDE	107
3.4	CONCLUSION	108

CHAPITRE 4 PROBLEMATIQUE ET QUESTIONS DE RECHERCHE 111

CHAPITRE 5 DEMARCHE METHODOLOGIQUE 115

5.1	LE CHOIX DE LA THEMATIQUE : LES PROPRIETES DE LA MATIERE	115
5.2	POSITIONNEMENT DE LA DEMARCHE METHODOLOGIQUE	116
5.2.1	L'INSCRIPTION AU SEIN D'UNE DEMARCHE CLINIQUE ET EXPERIMENTALE	116
5.2.2	L'ARTICULATION DES DIFFERENTS NIVEAUX D'ANALYSE	117
5.3	LE RECUEIL DES DONNEES ET LA CONSTRUCTION DE TRACES PRIMAIRES	118
5.3.1	LE DISPOSITIF DE RECHERCHE	118
5.3.2	CONSTRUCTION DES TRACES	119
5.3.2.1	Le corpus principal	119
5.3.2.2	Le corpus annexe	120
5.4	LE TRAITEMENT DES DONNEES ET LA CONSTRUCTION DE TRACES SECONDAIRES	122
5.4.1	LA TRANSCRIPTION ET SES MODALITES	122
5.4.2	LE SYNOPSIS ET SES MODALITES	123
5.4.3	LA STRUCTURE DE L'ANALYSE	127
5.4.3.1	Choix des phases et identification des extraits significatifs	127

5.4.3.2	Analyse des évènements significatifs : articulation du triplet de genèses avec l'analyse a priori du dispositif d'enseignement pour accéder à la logique interne de l'action des participants	128
5.4.3.3	Investigation des questions de recherche à partir des schémas récurrents d'action	131
5.5	CONCLUSION	132

CHAPITRE 6 ANALYSE DES SAVOIRS EN JEU ET DES OBSTACLES EPISTEMOLOGIQUES COMMUNS A TOUTES LES OBSERVATIONS **135**

6.1	LES MODELES SCIENTIFIQUES LIES A LA VAPEUR D'EAU, L'EAU LIQUIDE, L'EVAPORATION, LA CONDENSATION ET L'EBULLITION	135
6.1.1	LA VAPEUR D'EAU	135
6.1.2	L'ETAT LIQUIDE	136
6.1.3	L'EVAPORATION	136
6.1.4	LA CONDENSATION	138
6.1.5	L'EBULLITION	139
6.2	LES OBSTACLES EPISTEMOLOGIQUES RELATIFS A LA VAPEUR D'EAU, L'EAU LIQUIDE, L'EVAPORATION, LA CONDENSATION ET L'EBULLITION	141
6.2.1	LES OBSTACLES EPISTEMOLOGIQUES RELATIFS A LA VAPEUR D'EAU ET L'EAU LIQUIDE	141
6.2.2	LES OBSTACLES EPISTEMOLOGIQUES RELATIFS A L'EVAPORATION ET LA CONDENSATION	142
6.2.3	LES OBSTACLES EPISTEMOLOGIQUES RELATIFS A L'EBULLITION	144
6.2.4	LES OBSTACLES EPISTEMOLOGIQUES RELATIFS AU MODELE MOLECULAIRE DES ETATS DE LA MATIERE	145

CHAPITRE 7 ANALYSE EMPIRIQUE D'UNE CLASSE AU PRIMAIRE EN SUISSE ROMANDE : AMELIE **147**

7.1	PRESENTATION DU CONTEXTE DE LA CLASSE D'AMELIE	148
7.1.1	L'ECOLE ET LA CLASSE	148
7.1.2	L'ENSEIGNANTE	148
7.2	PRESENTATION GENERALE DES SEANCES OBSERVEES	148
7.3	PRESENTATION DES ENJEUX ETUDIES : N1, N4 ET N5	151
7.3.1	DESCRIPTION GENERALE DE L'ENJEU (N1) : INTRODUCTION DE LA CATEGORISATION DES ETATS DE LA MATIERE (SOLIDE, LIQUIDE, GAZ)	151
7.3.2	DESCRIPTION DE L'ENJEU (N4) : ETUDE DE L'ETAT GAZEUX ET DES PROPRIETES DES TRANSITIONS LIQUIDE-GAZ POUR L'EAU	154
7.3.3	DESCRIPTION GENERALE DE L'ENJEU (N5) : UTILISATION DE LA CATEGORISATION DES ETATS DE LA MATIERE POUR DECRIRE L'EAU DANS LA NATURE	157
7.3.4	CHOIX DES PHASES ETUDIEES	158
7.3.5	POSITIONNEMENT PAR RAPPORT AUX DOCUMENTS INSTITUTIONNELS DE REFERENCE	159
7.4	ANALYSE MICROSCOPIQUE DE CINQ PHASES : N13C, N41C ET N43A, N45A, N51C	160
7.4.1	ANALYSE DE LA PREMIERE PHASE (N13C) : MISE EN COMMUN DES DIFFERENTES CATEGORISATIONS DES 20 PHOTOGRAPHIES & INTRODUCTION DE LA CATEGORISATION PRIVILEGIEE (SOLIDE, LIQUIDE, GAZ)	160
7.4.2	ANALYSE DES DEUXIEME ET TROISIEME PHASES (N41C ET N43A) : L'ETUDE DE L'EBULLITION	167
7.4.3	ANALYSE DE LA QUATRIEME PHASE N45A : L'ETUDE DE LA CONDENSATION A TRAVERS DEUX EXPERIENCES	177
7.4.4	ANALYSE DE LA CINQUIEME PHASE N51C : LA CATEGORISATION DES OBJETS DE LA VIE QUOTIDIENNE (NUAGE, BUEE, BROUILLARD, ETC.)	180
7.5	SYNTHESE DE L'ANALYSE DES DIFFERENTS EXTRAITS : DYNAMIQUE DE CONSTRUCTION DES SAVOIRS ET SCHEMAS D'ACTION	184

CHAPITRE 8	ANALYSE EMPIRIQUE D'UNE CLASSE AU PRIMAIRE EN FRANCE : LOUISE	191
8.1	PRESENTATION DU CONTEXTE DE LA CLASSE DE LOUISE	191
8.1.1	L'ECOLE ET LA CLASSE	191
8.1.2	L'ENSEIGNANTE	191
8.2	PRESENTATION GENERALE DES SEANCES OBSERVEES	192
8.3	PRESENTATION DE L'ENJEU N2 ETUDIE : ÉTUDE DES PROPRIETES DE LA VAPEUR D'EAU, DE L'EAU LIQUIDE, DE L'EVAPORATION ET DE LA CONDENSATION	193
8.3.1	DESCRIPTION GENERALE DE L'ENJEU N2 : ÉTUDE DES PROPRIETES DE LA VAPEUR D'EAU, DE L'EAU LIQUIDE, DE L'EVAPORATION ET DE LA CONDENSATION	193
8.3.2	CHOIX DES PHASES ETUDIEES	196
8.3.3	POSITIONNEMENT PAR RAPPORT AUX DOCUMENTS INSTITUTIONNELS DE REFERENCE	197
8.4	ANALYSE MICROSCOPIQUE DES TROIS PHASES : N22C, N22G ET N24A	198
8.4.1	CONTEXTUALISATION DE CES TROIS PHASES AU SEIN DE LA SEQUENCE	198
8.4.2	ANALYSE A PRIORI DU MILIEU PRIMITIF	200
8.4.3	ANALYSE DE LA PHASE N22C : LES EXPLICATIONS DES ELEVES RELATIVES A LA DISPARITION DE L'EAU LIQUIDE	202
8.4.4	ANALYSE DE LA PHASE N22G : L'INTERPRETATION DE LA DISPARITION DE L'EAU LIQUIDE EN TERMES DE CHANGEMENT D'ETAT	209
8.4.5	ANALYSE DE LA PHASE N24A : LA CATEGORISATION DES OBJETS DE LA VIE QUOTIDIENNE (NUAGE, BUEE, BROUILLARD, ETC.)	214
8.5	SYNTHESE DE L'ANALYSE DES DIFFERENTS EXTRAITS : DYNAMIQUE DE CONSTRUCTION DES SAVOIRS ET SCHEMAS D'ACTION	219
CHAPITRE 9	ANALYSE EMPIRIQUE D'UNE CLASSE AU SECONDAIRE INFERIEUR EN SUISSE ROMANDE : ESTHER	227
9.1	PRESENTATION DU CONTEXTE DE LA CLASSE D'ESTHER	228
9.1.1	LE CYCLE D'ORIENTATION ET LA CLASSE	228
9.1.2	L'ENSEIGNANTE	228
9.2	PRESENTATION GENERALE DES SEANCES OBSERVEES	228
9.3	PRESENTATION DE L'ENJEU N2 ETUDIE : ÉTUDE DU PHENOMENE D'EVAPORATION AUX ECHELLES MACROSCOPIQUE ET MICROSCOPIQUE	230
9.3.1	DESCRIPTION GENERALE DE L'ENJEU N2 : ÉTUDE DU PHENOMENE D'EVAPORATION AUX ECHELLES MACROSCOPIQUE ET MICROSCOPIQUE	230
9.3.2	CHOIX DES PHASES ETUDIEES	233
9.3.3	POSITIONNEMENT PAR RAPPORT AU DOCUMENT INSTITUTIONNEL DE REFERENCE	234
9.4	ANALYSE MICROSCOPIQUE DES TROIS PHASES : N21F, N22B ET N22C	236
9.4.1	CONTEXTUALISATION DE CES TROIS PHASES AU SEIN DE LA SEQUENCE	236
9.4.2	ANALYSE A PRIORI DES MILIEUX PRIMITIFS MIS EN PLACE PAR L'ENSEIGNANTE	239
9.4.3	ANALYSE DE LA PHASE N21F : DISCUSSION DES HYPOTHESES ET ADOPTION D'UN MODELE MOLECULAIRE DE L'EVAPORATION	241
9.4.4	ANALYSE DE LA PHASE N22B: RECHERCHE DES FACTEURS D'EVAPORATION ET DE LEUR EXPLICATION AU NIVEAU DES MOLECULES	248
9.4.5	ANALYSE DE LA PHASE N22C : DISCUSSION DE L'INTERPRETATION MICROSCOPIQUE DES FACTEURS D'EVAPORATION	252
9.5	SYNTHESE DE L'ANALYSE DES DIFFERENTS EXTRAITS : DYNAMIQUE DE CONSTRUCTION DES SAVOIRS ET SCHEMAS D'ACTION	258

**CHAPITRE 10 ANALYSE EMPIRIQUE D'UNE CLASSE AU SECONDAIRE INFERIEUR EN FRANCE :
NATHAN 265**

10.1	PRESENTATION DU CONTEXTE DE LA CLASSE DE NATHAN	265
10.1.1	LE COLLEGE ET LA CLASSE	265
10.1.2	L'ENSEIGNANT	265
10.2	PRESENTATION GENERALE DES SEANCES OBSERVEES	265
10.3	PRESENTATION DE L'ENJEU N6 ETUDIE : ETUDE DES PROPRIETES DE L'EBULLITION DES CORPS PURS	268
10.3.1	DESCRIPTION GENERALE DE L'ENJEU N6 : ETUDE DES PROPRIETES DE L'EBULLITION DES CORPS PURS	268
10.3.2	CHOIX DES PHASES ETUDIEES	271
10.3.3	POSITIONNEMENT PAR RAPPORT AU DOCUMENT INSTITUTIONNEL DE REFERENCE	271
10.4	ANALYSE MICROSCOPIQUE DES QUATRE PHASES : N61C, N61B & N61D, ET N61E	272
10.4.1	CONTEXTUALISATION DE CES QUATRE PHASES AU SEIN DE LA SEQUENCE	272
10.4.2	ANALYSE DU MILIEU PRIMITIF MIS EN PLACE PAR L'ENSEIGNANT	274
10.4.2.1	Analyse a priori du dispositif d'enseignement relatif à la fiche d'hypothèses et la consigne associée	274
10.4.2.2	Analyse a priori du dispositif d'enseignement relatif à la fiche « d'étude expérimentale de l'évolution de la température de l'eau au cours de sa vaporisation » et la consigne associée	278
10.4.3	ANALYSE DE LA PHASE N61C : REALISATION DE L'EXPERIENCE D'EBULLITION DE L'EAU & TRACE DU GRAPHE	280
10.4.4	ANALYSE DES PHASES N61B ET N61D : REPONSE AUX QUESTIONS DE LA FICHE D'HYPOTHESES ET VALIDATION/INVALIDATION DE CES REPONSES APRES L'EXPERIENCE D'EBULLITION	290
10.4.5	ANALYSE DE LA PHASE N61E : BILAN DE L'EXPERIENCE D'EBULLITION DE L'EAU	294
10.5	SYNTHESE DE L'ANALYSE DES DIFFERENTS EXTRAITS : DYNAMIQUE DE CONSTRUCTION DES SAVOIRS ET SCHEMAS D'ACTION	303

CHAPITRE 11 DISCUSSION DES RESULTATS 311

11.1	LES FORMES D'EPISTEMOLOGIE PRATIQUE DANS LES CLASSES OBSERVEES	311
11.1.1	LE CAS D'AMELIE (PRIMAIRE, GENEVE)	311
11.1.1.1	Synthèse de l'analyse empirique de la classe d'Amélie (cf. 7.5, p. 184)	311
11.1.1.2	Les formes d'épistémologie pratique dans la classe d'Amélie	313
11.1.1.3	Conclusion	317
11.1.2	LE CAS DE LOUISE (PRIMAIRE, FRANCE)	317
11.1.2.1	Synthèse de l'analyse empirique de la classe de Louise (cf. 8.5, p. 219)	317
11.1.2.2	Les formes d'épistémologie pratique dans la classe de Louise	319
11.1.2.3	Conclusion	324
11.1.3	LE CAS D'ESTHER (SECONDAIRE, GENEVE)	324
11.1.3.1	Synthèse de l'analyse empirique de la classe d'Esther (cf. 9.5, p. 258)	324
11.1.3.2	Les formes d'épistémologie pratique dans la classe d'Esther	326
11.1.3.3	Conclusion	329
11.1.4	LE CAS DE NATHAN (SECONDAIRE, FRANCE)	330
11.1.4.1	Synthèse de l'analyse empirique de la classe de Nathan (cf. 10.5, p. 303)	330
11.1.4.2	Les formes d'épistémologie pratique dans la classe de Nathan	331
11.1.4.3	Conclusion	336
11.1.5	COMPARAISON DES PRINCIPES STRUCTURANTS SELON LES QUATRE CAS	337

11.2	CONDITIONS GENERIQUES DE L'ETABLISSEMENT D'UNE CONTINUITE ENTRE RAPPORTS AUX OBJETS CONSTRUITS PAR LES ELEVES ET RAPPORTS AUX OBJETS VISES PAR L'ENSEIGNANT	339
11.2.1	ETABLISSEMENT D'UNE CONTINUITE AU SEIN DE SITUATIONS PEU CONTRAINTEES	339
11.2.1.1	Définition et exemples de situations peu contraintes	339
11.2.1.2	Les situations peu contraintes au sein de certains travaux en didactique des sciences et de certains textes prescriptifs	340
11.2.1.3	Résultats : Conséquences des situations peu contraintes sur la continuité entre rapports établis par les élèves et rapports visés	341
11.2.1.4	Mise en perspective des résultats	343
11.2.1.5	Remarque : La confrontation des élèves avec des données empiriques brutes peut-elle faire évoluer favorablement les rapports qu'ils ont construits face à des situations peu contraintes ?	343
11.2.2	ETABLISSEMENT D'UNE CONTINUITE AU SEIN D'UNE SITUATION CONTRAINTE	344
11.2.2.1	Définition et exemples de situations contraintes	344
11.2.2.2	Les situations contraintes au sein de certains travaux en didactique des sciences et de certains textes prescriptifs	345
11.2.2.3	Résultats : Conséquences des situations contraintes sur la continuité entre rapports établis par les élèves et rapports visés	347
11.2.2.4	Mise en perspective des résultats	348
11.3	RETOUR SUR LE POSTULAT D'UNE ANALOGIE ENTRE APPRENTISSAGE DES SAVOIRS SCIENTIFIQUES A L'ECOLE ET PRODUCTION DES SAVOIRS AU SEIN DES COMMUNAUTES SCIENTIFIQUES	350
11.3.1	LE PARCOURS TRANSPOSITIF D'UN ASPECT DES PRATIQUES SCIENTIFIQUES DE REFERENCE : LA NATURE ET LA FONCTION DE L'HYPOTHESE	350
11.3.2	LE PARCOURS TRANSPOSITIF D'UN ASPECT DES PRATIQUES SCIENTIFIQUES DE REFERENCE : LA NECESSITE DE L'EXISTENCE D'UN CORPUS DE SAVOIR EXISTANT POUR PRODUIRE DE NOUVEAUX SAVOIRS	351
11.3.3	CONCLUSION PROVISoire	353
CONCLUSION		355
BIBLIOGRAPHIE		359
TABLE DES TABLEAUX		377
TABLE DES ILLUSTRATIONS		379
TABLE DES MATIERES		381
ANNEXES		388

ANNEXES (NON DIFFUSÉES)

