



HAL
open science

Les misconceptions dans la microgenèse de l'objet technique

Bouazza Ouarrak

► **To cite this version:**

Bouazza Ouarrak. Les misconceptions dans la microgenèse de l'objet technique. Education. Conservatoire national des arts et metiers - CNAM, 2011. Français. NNT : 2011CNAM0756 . tel-00844242

HAL Id: tel-00844242

<https://theses.hal.science/tel-00844242v1>

Submitted on 14 Jul 2013

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.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

Formation doctorale – Centre de Recherche sur la Formation

N° d’attribution par la bibliothèque

|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

THESE

pour obtenir le grade de Docteur du Conservatoire National des Arts et Métiers

Discipline : Sciences de l'éducation

présentée et soutenue publiquement par

Bouazza OUARRAK

le 7 juillet 2011

**Les misconceptions dans la microgenèse de
l’objet technique
chez des élèves ingénieurs du CESI**

Directeur de la thèse

Pierre PASTRE

PROFESSEUR EMERITE DU CNAM

Rapporteurs

BLANDIN Bernard, Directeur de recherches, HDR, Centre de recherche Education Formation (CREF – EA 1589) CESI

OLRY Pierre, Professeur, HDR, AGROSUP Dijon EDUTER Recherche, Laboratoire « Développement professionnel et formation »

Jury

CASPAR Pierre, Professeur émérite du C NAM, Paris.

TIBERGHIEEN Andrée, Directrice de recherche émérite au CNRS, UMR ICAR (5191), Lyon

Remerciements :

Mes plus grands remerciements vont à mon directeur de recherche, Pierre PASTRE, pour son enseignement, son accompagnement, sa patience, sa compréhension, ses éclairages et son soutien lors des moments difficiles.

Je remercie tout particulièrement :

Bernard BLANDIN de m'avoir accueilli au CESI, de m'avoir supporté depuis mon engagement dans cette thèse, de sa bienveillance et de sa compréhension.

Je remercie :

Andrée THIBERGHIEEN pour son accueil à Lyon et pour ses conseils avisés sur la manière d'aborder le corpus.

Pierre CASPAR de m'avoir fait bénéficier de ses réflexions sur l'APP.

Paul ORLY de sa bienveillance et de son écoute attentive depuis mon engagement dans le DEA au CNAM.

Je remercie également mes collègues du séminaire doctoral et plus particulièrement Pierre PARAGE et Gérard DELACOUR, de m'avoir soutenu et encouragé à finir cette thèse.

Résumé :

Cette thèse explore les ressources cognitives que mobilisent des élèves ingénieurs dans un APP (Apprentissage par problème) dans une tâche de conception d'un objet technique. La situation-problème à laquelle ces élèves sont confrontés est constituée par un système technique inédit de réfrigération sans apport extérieur d'énergie. Dans cet apprentissage, les élèves doivent concevoir l'objet technique et apprendre des concepts en thermodynamique. Deux groupes d'élèves sont comparés : le premier dispose d'un modèle analogique d'une situation connue pour aborder la situation nouvelle, le second ne dispose que du texte.

Les questions de recherches : Que construisent ces élèves comme connaissances ? Qu'apportent ces deux types d'apprentissage (l'apprentissage par une situation connue et l'apprentissage par le texte) ? Quels sont les obstacles que rencontrent ces élèves ?

Les hypothèses : un apprentissage par une situation connue conduit à la construction de connaissances opératives (des concepts outils). Un apprentissage par le texte conduit à la construction de connaissances décontextualisées (des concepts objets). Un apprentissage par les situations dans un dispositif didactique conduit ultérieurement à la construction de concepts catégoriels. Ces deux types d'apprentissage impliquent l'obstacle épistémologique dans la construction des concepts dans leurs deux fonctions : outil et objet.

Mots clés : *Apprentissage, APP, système technique, conceptualisation, misconceptions, obstacle épistémologique, dialectique objet/outil, modèle opératif, modèle épistémique.*

Abstract :

This thesis investigates the cognitive resources that pupils engineers in an PBL (Problem based Learning) in a task of conception of a technical object mobilize. The situation-problem with which these pupils are confronted is constituted by an unpublished technical system of refrigeration without outside contribution of energy. In this learning, the pupils have to conceive the technical object and learn concepts in thermodynamics. Two groups of pupils are compared: the first one has an analogical model of a situation known to approach the new situation; the second has only the text.

The questions of researches: what build these pupils as knowledge? What bring these two types of learning (the learning by a known situation and the learning by the text)? What are the obstacles which meet these pupils?

The hypotheses: a learning by a known situation leads to the construction of operational knowledge (concepts tools). A learning by the text leads to the construction of knowledge out of context (concepts objects). A learning by the situations in a didactic device leads later to the construction of category-specific concepts. These two types of learning involve the epistemological obstacle in the construction of the concepts in them two functions: tool and object.

Learning, PBL, conceptualisation, misconceptions, epistemological obstacle, dialectic tool/object, operational model, epistemological model.

Table des matières :

Introduction	11
Chapitre 1 : Le contexte de recherche	13
1. La formation par l’alternance	14
2. La formation par le projet	16
3. La formation par les compétences	17
4. Les dispositifs de formation	19
5. L’approche par problèmes (l’APP)	22
6. Les sources d’inspiration de l’APP :	23
7. Introduction de l’APP au Cesi :	24
7.1. L’APP à l’eXia.Cesi :	24
7.2. L’APP au centre de Bagneux :	25
7.3. Une expérience similaire à celle de l’eXia : la réforme Candis 2000 à l’UCL	25
7.4. Quelques études sur les effets de l’APP :	25
Quelques résultats en bref sur les effets de l’APP :	26
Chapitre 2 : L’analyse de la tâche	29
1. Les ressources documentaires pour réaliser la tâche :	30
La documentation fournie aux élèves	30
1.1. Le guide de l’étudiant d’APP :	30
1.2. Le texte de l’article de la revue sur la canette auto rafraîchissante :	31
1.3. Les dictionnaires usuels :	32
1.4. La documentation technique et scientifique :	32
2. Une tâche principale composée de deux sous tâches	33
3. La structure conceptuelle du modèle de fonctionnement du système de la canette	33
3.1. Forme et géométrie de la canette :	33
3.2. Le mode d’utilisation de la canette :	35
3.3. Le fonctionnement du système de la canette :	36
3.3.1. L’état initial :	40
3.3.2. Le processus de réfrigération :	41
3.3.3. L’état final :	43
3.3.4. La canette est un système technique	43
3.4. Dimensionnement de la canette	45
3.5. Liste des notions et concepts à mobiliser dans l’explication du phénomène de la canette :	43

4. Annexe : Guide de l'apprenti en APP	47
Chapitre 3 : Problématique et cadre théorique	52
1. L'APP observé relève du constructivisme :	52
2. L'APP observé est un apprentissage en situation didactique :	54
3. L'APP observé est un apprentissage d'un contenu spécifique :	59
4. L'APP observé relève d'une genèse :	63
4.1. Théorie des genèses conceptuelles :	63
4.2 Les moments de genèse :	66
4.3. Quelques études empiriques sur les microgenèses :	66
4.3.1. Microgenèse du réglage d'un instrument :	66
4.3.2. Microgenèse de l'utilisation d'un instrument :	70
4.3.3. Microgenèse du dépannage d'une motrice de rames de Métropolitain :	73
4.3.4. Microgenèse du dépannage de cartes électroniques :	75
4.3.5. Microgenèse de la conception d'un objet technique :	79
Discussion :	81
5. L'APP implique l'obstacle épistémologique	85
5.1. L'obstacle épistémologique chez Bachelard :	85
5.2. L'obstacle épistémologique en didactique :	89
5.2.1. L'obstacle épistémologique chez Brousseau :	90
5.3. Obstacle épistémologique, formes de conceptualisation et types de concepts :	91
5.3.1. Élaboration d'un concept et acquisition d'un concept :	91
5.3.2. L'exemple de la difficulté dans la construction du concept de symétrie :	92
5.3.3. Connaissances communes et connaissances scientifiques :	96
5.3.4. Concepts catégoriels et concepts formels :	98
5.3.5. Raisonnement spontané (ou naturel) et raisonnement canonique :	100
5.4. Quelques exemples de misconceptions en didactiques des sciences :	102
5.4.1. Exemple de misconceptions portant sur le concept de chaleur	102
5.4.2. Exemples de misconceptions portant sur les raisonnements	103
5.4.3.1. Raisonnement séquentiel	103
5.4.3.2. Raisonnement linéaire causal :	106
5.4.3.3. Raisonnement à variables réduites :	107
6. L'APP observé est une genèse de l'objet technique	109
7. Conclusion :	112
8. Hypothèse générale :	113
Chapitre 4. : Analyse et résultats	114
1. Introduction :	114

1.1. Quelques caractéristiques des élèves observés :	114
1.2. Constitution des données :	115
1.3. Rappel de la tâche à réaliser :	115
2. Description du fonctionnement global des deux groupes	117
2.1. Fonctionnement du groupe 1 :	118
2.2. Fonctionnement du groupe 2 :	119
3. Les hypothèses :	121
Hypothèse générale :	121
Hypothèse 1 :	121
Hypothèse 2 :	121
Hypothèse 3 :	122
Hypothèse 4 :	122
4. Méthodologie :	123
5. Analyse du groupe 1 : L'apprentissage d'une situation nouvelle par analogie à une situation connue	125
5.1. L'évocation du modèle analogique d'une situation connue chez BN :	127
5.2. Conception de l'objet technique chez BN :	128
5.2.1. Conception initiale de l'évaporation dans la canette :	128
5.2.1.1. Mobilisation du modèle initial du réfrigérateur	128
5.2.1.1.1. L'assimilation de l'évaporation dans la situation nouvelle à celle dans la situation connue	129
5.2.1.1.2. L'accommodation du modèle mobilisé à la nouvelle situation : la mise sous vide de l'eau change les caractéristiques de l'eau pour lui permettre de s'évaporer à basse température	130
5.2.2. Conception d'une évaporation par une variation de la température et de la pression et par un apport de chaleur	132
Commentaire :	134
5.2.3. Conception initiale de l'adsorption :	134
5.2.3.1. Explication de l'adsorption par la transformation dans le dessicant de la vapeur en liquide	136
5.2.3.2. Explication de l'adsorption et du transfert thermique par le vide dans la cavité du dessicant :	137
5.2.4. Conception d'un transfert thermique par dépression :	137
5.2.5. Conception d'un état diphasique de l'eau avant l'ouverture de la valve :	140
5.2.6. Conception d'une évaporation par dépression au démarrage du système :	141
5.2.7. Développement de la conception initiale de l'adsorption :	144
5.2.8. Conception du fonctionnement du système par une reconfiguration de l'ensemble dans un modèle cohérent :	145

5.3. La construction des concepts chez BN :	147
5.3.1. Cas particulier du concept d'évaporation :	147
5.3.1.1 Etape 1 :	147
5.3.1.2 Étape 2 :	147
5.3.1.3 Étape 3 :	147
5.3.2. Le concept d'adsorption :	148
5.3.3. Quelques commentaires :	148
5.3.3.1. Le processus cognitif :	148
5.3.3.2. Le mode d'apprentissage :	148
5.4. Conception de l'objet technique DL :	149
5.4.1. L'évocation de la situation connue par DL :	150
5.4.2. L'application du modèle de la situation connue à la situation nouvelle :	152
5.4.3. La valve est un détendeur :	153
5.4.4. De la valve conçue comme un détendeur au concept de détente :	154
5.4.6. Du concept de détente à celui de dépression :	155
6. Analyse du groupe 2: un apprentissage par le texte	157
6.1. Construction des concepts chez PA :	158
6.1.1. Le concept d'adsorption :	159
6.1.1.1. Étape 1 :	159
6.1.1.2. Étape 2 :	159
6.1.2. Les concepts d'évaporation et de changement de phase chez PA :	160
6.1.2.1. Étape 1 :	160
6.1.2.2. Étape 2 :	161
6.1.2.3. Étape 3 :	162
6.2. Conception de l'objet technique chez PA	163
6.2.1. Premières hypothèses partielles et générales qui abordent la réfrigération par l'adsorption :	164
6.2.2. Des hypothèses partielles et générales sur l'évaporation :	164
6.2.3. Des hypothèses partielles à une hypothèse globale et générale sur la réfrigération :	165
6.2.4. Le transfert thermique par aspiration de la vapeur : le dessicant joue le rôle d'une pompe à vapeur qui aspire la vapeur	167
6.2.4. Le transfert thermique par refoulement de la vapeur : l'échangeur thermique est une machine à vapeur qui refoule ou pousse la vapeur :	167
6.2.5. Transfert thermique par la dépression :	169
6.2.6. L'évaporation par dépression :	170
6.2.7. Problèmes posés par la dépression dans la conception du fonctionnement de la canette :	170

6.2.8. Quelques commentaires :	172
6.2.9. Les raisons de l'échec dans la construction du modèle de l'objet	173
6.3. Construction des concepts chez DM :	174
6.3.1. L'absorption :	174
6.3.2. Le concept d'évaporation :	175
6.3.3. Les concepts de chaleur, calorie et température :	176
6.3.3.1. Chaleur :	176
6.3.3.2. Chaleur et calorie :	177
6.3.4. La relation entre la chaleur et la température :	177
6.3.5. Le concept de vide :	177
6.4. Conception de l'objet technique chez DM	178
6.4.1. L'hypothèse d'un transfert thermique par le vide existant dans la cavité du dessicant	179
6.4.2. L'hypothèse d'un transfert thermique par le pompage de la vapeur	180
6.4.3. L'hypothèse d'une évaporation totale de l'eau avant l'ouverture de la valve indépendamment de la réfrigération	180
6.4.4. L'hypothèse d'une évaporation totale avant l'ouverture de la valve en relation avec le rafraichissement de la boisson	181
6.4.5. L'hypothèse d'un pompage par l'action de la vapeur sur le vide existant dans la cavité du dessicant	182
6.4.6. L'hypothèse d'une évaporation avant et après l'ouverture de la valve par la mise en jeu de l'état diphasique	182
6.4.7. L'hypothèse d'un pompage par diffusion de la vapeur et par adsorption	183
6.4.8. L'hypothèse d'une évaporation par dépression après l'ouverture de la valve.	184
Chapitre 5 : Discussion générale	187
1. Apprentissage par les situations et apprentissage par le texte :	187
1.1. L'apprentissage dans le premier groupe : un apprentissage par les situations dans une activité de conception	188
1.2. L'apprentissage dans le second groupe : un apprentissage par le texte dans une même activité de conception	189
2. Concepts outil et concept objet dans les deux apprentissages :	190
2.1. La nature du concept :	190
2.1.1. Les concepts issus d'un savoir "constitué"	190
2.1.2. Les concepts produits par une activité de conceptualisation du réel	191
2.2. La fonction du concept :	191
2.2.1. Le concept outil :	191

2.2.2. Le concept objet :	191
2.3. Nature et fonction des concepts dans l'apprentissage :	192
2.3.1. Nature et fonction des concepts chez BN :	192
2.3.2. Nature et fonction des concepts chez DL :	194
2.3.3. Nature et fonction des concepts chez BN :	195
2.3.4. Nature et fonction des concepts chez DL :	195
2.4. Passage d'une fonction du concept à l'autre :	196
2.4.1. Passage d'un concept outil ancien à un concept outil nouveau :	196
2.4.1.1. Le cas BN :	196
2.4.1.2. Le cas DL :	196
2.4.2. Passage du MO initial au MO nouveau :	197
2.4.3. Passage de la fonction objet à la fonction outil :	198
2.4.4. Passage de la fonction outil à la fonction objet :	199
2.4.5. Conclusion :	199
3. Les misconceptions :	200
3.1. Les misconceptions qui portent sur les concepts dans leur fonction outil et objet :	202
3.1.1. Les misconceptions qui disparaissent :	202
3.1.1.1. Le concept d'évaporation chez BN :	202
3.1.1.2. Le concept de transfert thermique chez BN :	202
3.1.1.3. Le concept d'adsorption chez BN :	203
3.1.1.4. Le concept objet d'adsorption chez BN :	203
3.1.1.5. Le concept d'adsorption chez PA :	204
3.1.1.6. Concept objet d'évaporation chez PA :	204
3.1.1.7. Concept outil de vide chez PA :	205
3.1.2. Les misconceptions qui persistent :	205
3.1.2.1. Le concept outil de couple pression-température chez BN :	205
3.1.2.2. Le concept de chaleur chez PA :	205
3.1.2.3. Le concept de chaleur (outil/objet) en tant que variable dans l'évaporation chez PA :	206
3.1.2.4. Le concept outil de l'évaporation chez PA :	206
3.1.2.5. Le concept de vide chez DM :	206
3.1.2.6. La relation chaleur température dans l'évaporation chez DM :	207
3.2. Les misconceptions qui portent sur les raisonnements :	207
3.2.1. Les différents types de raisonnement observés :	208
3.2.1.1. Le raisonnement séquentiel :	208
3.2.1.2. Le raisonnement linéaire causal :	208
3.2.1.3. Le raisonnement à variable réduite :	208
3.3. Les misconceptions qui portent sur les raisonnements dans le groupe 1 :	209

3.3.1. Le cas BN	209
3.4. Les misconceptions qui portent sur les raisonnements dans le groupe 2 :	211
3.4.1. Le raisonnement séquentiel chez PA :	211
3.4.2. Le raisonnement linéaire causal chez PA :	215
3.4.3. Le raisonnement à variables réduites chez PA :	215
4. En guise de conclusion	217
Bibliographie sommaire	221
Annexes	226

INTRODUCTION

Depuis plusieurs décennies, on assiste à un regain d'intérêt dans la formation professionnelle pour l'approche par problème ou l'apprentissage par problème (*APP ou PBL : Problems Based Learning*). C'est le cas de la formation professionnelle des ingénieurs généralistes de l'école du CESI.

L'approche par problème est utilisée actuellement comme méthode d'apprentissage d'une activité ou d'un métier et d'apprentissage d'une théorie.

On sait très peu de choses sur les processus d'apprentissage qu'induit cette méthode, notamment dans la formation des ingénieurs. Les études les plus abondantes concernent le champ des sciences médicales dont cette méthode est issue.

Cette étude explore l'apprentissage par problème (APP) chez des élèves de première année en formation professionnelle dans l'une des écoles du CESI.

Le premier chapitre présente le contexte dans lequel se situent cet apprentissage et celui dans lequel nous l'avons abordé.

Cet apprentissage s'effectue dans une activité de conception d'un système technique nouveau, appartenant au champ de la thermodynamique. Ce qui soulève des questions auxquelles nous tenterons de répondre dans notre étude, à savoir :

Qu'apprennent effectivement ces élèves : la conception de l'objet technique, une théorie scientifique, ou les deux à la fois ?

Comment s'effectue cet apprentissage dans ces différents cas ? Autrement dit, quel est le processus cognitif mis en jeu dans cet apprentissage ?

Le deuxième chapitre présente la tâche qui apporte quelques clarifications par rapport au contenu de l'apprentissage, à son but et aux conditions de son déroulement.

Le troisième chapitre présente la problématique et le cadre théorique utilisé dans cette étude.

La conception de l'objet technique a un rapport avec l'apprentissage du métier d'ingénieur. Elle est l'une des activités propre à l'ingénieur.

Pour analyser cet aspect de l'apprentissage nous convoquerons le cadre théorique de la didactique professionnelle qui s'inscrit dans le cadre théorique plus large du constructivisme.

L'apprentissage d'une théorie vise à doter l'ingénieur d'un savoir scientifique nécessaire dans l'exercice de son métier. Ce savoir scientifique n'a aucun intérêt pour l'ingénieur s'il ne sert pas son métier et son activité professionnelle. L'acquisition de ce savoir théorique se justifie par ce but ultime. Ce savoir théorique participe, entre autre, à la conception et à la réalisation d'objets techniques. Le problème qui se pose est son acquisition non pas en tant que savoir purement théorique et décontextualisé, pour servir ses diverses activités, notamment l'activité de conception.

Pour analyser l'acquisition de ce savoir nous convoquerons le cadre théorique de la didactique des sciences, notamment celui de la didactique de la physique.

Dans le quatrième chapitre nous présenterons notre analyse où nous comparons l'apprentissage par problème chez deux groupes d'élèves.

Dans le cinquième chapitre nous présentons une discussion qui prolonge l'analyse à l'aide de quelques concepts qui éclairent cet apprentissage.

Chapitre 1

Contexte de recherche

Notre observation s'est déroulée à l'école d'ingénieurs de Bagneux du Groupe CESI. Notre projet d'étude initial portait sur les compétences critiques de l'ingénieur généraliste du CESI. Ce projet s'inscrivait dans le programme de recherche lancé par le CESI pour préciser les conditions d'efficacité des apprentissages professionnels au sein de l'Ecole d'ingénieurs du CESI. Dans ce cadre nous avons participé en 2007 à une observation longitudinale d'un groupe d'élèves de première année en formation à l'école de Bagneux.

Le CESI a introduit depuis quelques années l'approche par problème APP, ou *problem-based Learning* (PBL en anglais) comme méthode pédagogique pour l'apprentissage des sciences. A l'école de Bagneux cette méthode est utilisée à l'état expérimental dans l'apprentissage de la thermodynamique. Cette méthode s'insère plus précisément dans le cursus des élèves de première année sous forme de module complémentaire au cours de thermodynamique. La situation-problème développée dans ce module consiste en une canette auto-rafraîchissante (cf. chap.. 2 : la tâche).

Avant de généraliser cette approche par problème à toutes les disciplines scientifiques enseignées, l'Ecole des ingénieurs du CESI a souhaité comprendre les processus d'apprentissage et de développement des compétences à l'œuvre dans les séances d'APP.

Le CESI a décidé de réaliser une analyse de l'activité de l'enseignant et de l'activité des élèves ingénieurs au cours d'une session APP.

Le directeur de recherches nous a invité à participer à cette observation. Ce fut pour nous une opportunité d'étudier une séquence d'apprentissage de plus près.

L'introduction de l'APP comme méthode d'apprentissage s'inscrit dans cette volonté constante depuis le début d'améliorer la formation des ingénieurs du CESI.

En effet, depuis sa création, le CESI n'a pas cessé d'innover en matière pédagogique et à mettre sur pied des dispositifs adaptés aux publics auxquels il s'adresse et aux domaines qu'il aborde.

Actuellement, le CESI utilise un large éventail d'approches et de méthodes pédagogiques qui se combinent et s'imbriquent les unes dans les autres, dont trois approches pédagogiques constituent l'armature de base aux formations qu'il propose : l'alternance, la

pédagogie du projet et l'approche par les compétences auxquelles on peut ajouter l'approche par problème.

1. La formation par l'alternance :

Dans les pédagogies adoptées par le CESI, l'alternance constitue depuis le départ l'axe principal. Elle fait partie de son histoire.

Bref historique :

La loi sur la formation professionnelle alternée de 1987 va donner un cadre juridique à cette orientation pédagogique de l'alternance du CESI prise au départ.

La formation par alternance associe un enseignement théorique dans un établissement d'enseignement à un stage pratique en entreprise (Léné, 2002). Elle a pour but l'acquisition d'une qualification professionnelle. Elle peut prendre la forme d'un contrat d'apprentissage ou d'un contrat de professionnalisation.

Le principe de l'alternance repose sur le constat que le travail est potentiellement formateur. Elle permet d'apprendre ce qui ne s'enseigne pas en formation et qui pourtant constitue une partie essentielle de la compétence : l'expérience.

La définition courante¹ de la formation par alternance la conçoit comme une formation qui associe, de manière alternée, deux types d'activités : des enseignements et apprentissages généraux, professionnels et/ou techniques, dans des lieux choisis de formation, pour l'acquisition de savoirs et l'exercice dans un milieu professionnel d'une activité en relation avec la formation reçue, pour l'acquisition de savoir-faire, voire pour l'apprentissage même du contexte socioprofessionnel.

La définition « savante »² la conçoit comme une contribution de la formation par alternance à la construction des compétences.

La formation par l'alternance n'est pas une « alternance juxta positive » qui consiste en une simple succession de moments théoriques et de moments pratiques. C'est une alternance intégrative où les deux moments de formation interagissent l'un sur l'autre et s'alimentent mutuellement. Ces deux moments sont indissociables et indispensables à la construction des compétences.

Les moments de production contribuent à la construction de « ressources » (connaissances, savoir-faire, savoir être, ...) utiles à la constitution de compétences.

1 - Encyclopédie de la formation en ligne, www.encyclopedie-de-la-formation.fr.

2 - *ibid.*

Les moments de formation permettent d'entraîner à la prise de recul, à la distanciation, à la conceptualisation du savoir-faire acquis sur les lieux de production. Cette conceptualisation devient possible lorsqu'on est libéré des contraintes de la production (Pastré, 2005). Les passages par l'école sont des moments où cette conceptualisation peut se réaliser.

Le modèle de la « formation par alternance » couvre des modalités très variables qui ont toutes pour invariant l'articulation des séquences de formation par le travail productif ou sur le lieu productif et des séquences scolaires ou de formation théorique (Landry, 2002). La formation par alternance est un principe pédagogique qui vise à relier une formation théorique et des apprentissages pratiques. Les domaines d'application de ce principe sont divers. En dehors de son application dans le champ de la formation professionnelle, il est aussi exploité pour lutter contre l'échec scolaire ou pour rapprocher l'école de l'entreprise en vue d'adapter l'enseignement au marché de l'emploi (Mazalon, 1994). L'alternance ne se limite pas uniquement à la pédagogie qui vise à rapprocher « théorie et pratique », elle permet aussi de construire des relations plus étroites entre l'univers éducatif et l'univers productif, entre l'école et l'entreprise, l'éducation et le travail, entre la formation et l'emploi. Elle est considérée comme un des indices d'un processus d'ensemble (Hardy et Maroy, 1995).

Le rapprochement entre les deux pôles (théorie et pratique) peut porter soit sur les contenus de l'enseignement soit sur les formes pédagogiques de transmission soit sur les formes institutionnelles d'évaluation, de planification, de contrôle et d'habilitation. Pour les contenus, les curricula sont définis en termes de compétences, mobilisables dans les situations de travail. Pour les formes pédagogiques de transmission et d'acquisition des compétences les deux formes sont combinées : celle que nous appelons transmission par le texte et celle par l'action en situation réelle. Pour les formes institutionnelles, l'évaluation, la planification et l'habilitationnelles se sont ouvertes aux acteurs socio-économiques dans des partenariats où enseignants et professionnels siègent et décident ensemble au niveau d'une même instance. Sous cet angle, l'alternance apparaît comme un système large qui ne se réduit pas uniquement à une pédagogie. On la comprend mieux lorsqu'on l'aborde sous cet angle. Cet ensemble constitue un cadre dans lequel se déploie l'alternance.

Les écoles d'ingénieurs s'appuient pratiquement toutes actuellement sur l'alternance. Il existe en France environ 240³ écoles d'ingénieurs, dont le CESI, qui proposent toutes des

3 - INSEE, Chiffre de 2006.

formations par alternance ou des formations d'ingénieurs en partenariat (FIP). Les FIP (formation d'ingénieurs en partenariat) constituent l'équivalent de la formation en alternance.

Sur le plan juridique, les deux dispositifs légaux les plus utilisés dans la formation professionnelle sont : le contrat d'apprentissage et le contrat de professionnalisation.

Le contrat d'apprentissage a pour objectif premier l'obtention d'un diplôme d'Etat ou d'un titre inscrit au répertoire national des certifications professionnelles. Il s'adresse par priorité à des jeunes attirés par des métiers et promeut une pédagogie spécifique dont le maître d'apprentissage est le pivot.

Le contrat de professionnalisation vise en premier lieu l'insertion professionnelle ou la montée en compétence des individus, sans nécessairement aboutir à un diplôme. Il permet d'acquérir une compétence ou une certification dans le but de satisfaire le projet personnel de l'individu et celui de l'entreprise.

2. La formation par le projet :

Parmi les autres méthodes pédagogiques utilisées au CESI figure la pédagogie par « projet ». La notion de projet en pédagogie est issue de pratiques de formation et d'éducation. Comme le souligne Boutinet (2001), le concept de projet est un « concept flou s'il en est un »⁴. Il désigne « une réalité souvent paradoxale renvoyant à des référents très divers »⁵. Ce que Boutinet dit du projet dans ses différentes variétés peut s'appliquer aussi au projet en pédagogie. Celui-ci correspond beaucoup plus à des pratiques, qu'à un concept, sous couvert de la désignation de « méthode ». Sous cette forme, le projet en pédagogie vient de la méthode Winnetka en 1910 et du plan Dalton en 1911 aux USA. Par la suite, le projet est converti en une technique d'enseignement et de formation à part entière.

Néanmoins, on peut citer au moins trois précurseurs ou initiateurs de la pédagogie par projet : Dewey, Makarenko et Freinet.

Pour Dewey (USA, 1859-1952), le projet centre les connaissances à acquérir sur un thème de travail, comme par exemple l'étude d'une usine. Dewey fut le promoteur d'un apprentissage par le faire (*Learning by doing*). Il conçoit que l'apprentissage doit être centré sur les occupations de l'élève et sur la formation cognitive par l'expérience effectuée. Dans cet apprentissage, le maître a un rôle de guide.

4 -Boutinet J-P. (2001) p. 293.

5 - ibid., p. 293.

Makarenko (ex-URSS), développe la méthode des complexes. Celle-ci fonctionne aussi autour d'une production, d'un thème d'actions et de recherche, socialement utiles et résultant d'actions individuelles et collectives. Pour cet auteur tout travail utile à la société peut être servir comme instrument de formation et d'éducation.

Freinet (Célestin, France), en s'inspirant des méthodes soviétiques, développe sa propre méthode autour de trois points clés : les connaissances s'élaborent grâce aux projets d'actions et de recherches ; la classe est organisée en coopérative ; l'école produit et diffuse ses propres instruments de travail (dont le journal scolaire).

Au Ceci, qui recherche avant tout l'efficacité dans les pratiques pédagogiques, l'approche par projet est concrétisée par le projet individuel industriel PII qui s'inscrit dans le cursus de la formation des ingénieurs par la formation continue (FIFC), et dans celui de la formation des ingénieurs par apprentissage (FIA) (voir plus loin ces deux formations). Le PII devient le second pilier de la formation des ingénieurs généralistes. Avec le PII la formation évolue également vers une approche plus individualisée. Du point de vue de l'apprentissage, le PII sert comme moyen d'évaluation des capacités de l'élève à concevoir et à réaliser un projet réel et utile à l'entreprise. Dans l'évaluation, l'entreprise, par le biais du tuteur, est partie prenante. Pour l'école, l'obtention du diplôme est liée à la réussite du projet en fin de parcours.

3. La formation par les compétences :

Depuis plusieurs années, l'approche par les « compétences » a réorienté et enrichi ces deux approches fondamentales en direction du développement des compétences. Cette nouvelle orientation s'est concrétisée par un référentiel des compétences « ingénieur CESI » qui a été présenté dans le dossier du renouvellement à la CTI en 2005. Les objectifs de la formation de l'ingénieur généraliste figurant dans ce référentiel visent à lui faire acquérir :

- « - de solides connaissances scientifiques et une large culture technique
- des outils d'analyse et de synthèse et une aisance de raisonnement logique
- une maîtrise d'outils méthodologiques utilisés dans l'industrie
- des méthodes d'innovation et de veille concurrentielle et technologique
- des connaissances en économie, en gestion et droit appliquées à l'industrie

- de réelles capacités d'expression écrite et orale, et la maîtrise de l'anglais professionnel »⁶.

Ces six objectifs sont assortis de 13 capacités que la formation par les compétences développera chez l'ingénieur CESI lui permettant de faire face à sa mission future (voir annexe à ce chapitre).

1. Gérer des projets :

Définir et appliquer les méthodes de création et de fonctionnement de l'équipe de projet, établir et mettre en œuvre des projets.

Développer les comportements d'appropriation et de leadership au sein de l'équipe.

2. Gérer des processus :

Concevoir et gérer des processus en tenant compte des procédures internes et des attentes externes et en respectant les contraintes normatives.

3. Gérer des ressources humaines :

Adapter et développer les compétences professionnelles au sein d'une équipe, créer un environnement professionnel favorisant l'autonomie des personnes et l'émergence des comportements innovants.

4. Dynamiser le système qualité :

Mettre en œuvre et gérer le système d'assurance qualité de l'entreprise, savoir définir et mettre en œuvre des techniques de management orientées qualité totale.

5. Dynamiser le système commercial :

Comprendre les modes d'évolution des marchés et des attentes des clients, définir des politiques commerciales, établir et gérer un plan commercial, mettre en place un SAV.

6. Dynamiser le système de production :

Analyser et améliorer les méthodes et gammes de production, optimiser et rationaliser les flux physiques, organiser et gérer le système de maintenance.

7. Dynamiser le système d'achats et d'approvisionnements :

Concevoir et réaliser une stratégie d'achats, définir et gérer un plan d'achats, fiabiliser les approvisionnements.

8. Dynamiser le système de conception :

6 - Cf. Dossier de renouvellement d'habilitation des formations d'ingénieurs de l'école d'ingénieurs du CESI, 2005, p. 19, annexe D1, formation généraliste.

Participer à l'évolution et à la création de produits, réaliser le cahier des charges et l'avant-projet, déterminer et mettre en œuvre l'industrialisation.

9. S'exprimer et communiquer efficacement :

Intégrer les approches transculturelles/interculturelles, développer les capacités d'expression en langues.

10. Rechercher, gérer, produire de l'information :

Développer la mobilité intellectuelle, analyser les besoins et utiliser les moyens adéquats.

11. Gérer l'innovation :

Identifier, mettre en place et capitaliser les processus d'innovation dans le cadre du développement stratégique de son organisation.

12. Intégrer la stratégie d'entreprise :

Comprendre et intégrer les organisations dans les dimensions politiques, économiques, sociales, industrielles et commerciales.

13. Détecter et intégrer les nouvelles technologies :

Conduire une veille technologique et s'appropriier les nouvelles technologies pour les utiliser au quotidien.

4. Les dispositifs de formation :

Ces trois approches sont combinées et concrétisées dans différents dispositifs de formations, comme c'est le cas des deux dispositifs de formations des ingénieurs généralistes que nous avons vu de plus près : la FIFC (Formation d'ingénieurs par la formation continue) et la FIA (Formation d'ingénieurs par l'apprentissage).

La FIFC :

C'est une formation qui dure 20 mois à plein temps. Elle est ouverte à des candidats titulaires d'un Bac ou plus scientifique ou technique qui ont une expérience professionnelle d'au moins 3 ans qui ont satisfait aux épreuves de sélection.

La formation s'effectue par une alternance organisée de la manière suivante :

13 mois de formation intense à l'école comprenant le tronc commun et incluant des temps d'individualisation du parcours de formation

7 mois dans une entreprise pour réaliser un projet industriel (PII) qui fera l'objet d'une soutenance de fin d'étude.

La FIA :

C'est une formation qui dure 3 ans. Elle est accessible à des candidats titulaires d'un Bac, ou plus, scientifique ou technique, qui ont satisfait aux épreuves de sélection et qui ont signé un contrat d'apprentissage avec une entreprise. La grande majorité des candidats accueillis par le CESI disposent d'un Bac plus 2 au minimum ou d'un Bac plus une année ou de 2 de préparation. Nous avons noté en 2007 deux candidats titulaires d'un diplôme de 3^{ème} cycle dont l'un d'un doctorat en physique.

La formation s'effectue par alternance entre l'entreprise et le centre de formation. Elle intègre un tronc commun et un projet individuel de formation ou (PFI ou PII), qui fera l'objet d'une soutenance de fin d'étude, ainsi qu'une mission de 3 mois à l'étranger.

Le CESI délivre un diplôme d'ingénieur du CESI pour ces deux formations reconnu par la CTI.

La combinaison de ces trois approches se note dans le cursus de ces deux formations.

Ce cursus a évolué considérablement. Il s'oriente actuellement de plus en plus vers une formation individualisée centrée sur le management de projet. Celui-ci est conçu à la fois comme méthode « projet moyen », (Pallado, 2007) et se traduit dans les faits en fin de parcours par la réalisation d'un Projet Industriel Individuel qui est « projet but » (Blandin et al, 2007) dont l'entreprise d'accueil est le bénéficiaire.

Les points communs et les différences des deux dispositifs de formation d'ingénieur généraliste du CESI sont synthétisés dans le tableau ci-dessous⁷.

Ces deux formations sont orientées par un principe exprimé sous forme de slogan « être technicien supérieur pour devenir ingénieur ».

7 - Tableau extrait de Bernard Blandin et al (2007), Socialisation et développement des compétences de l'élève ingénieur, Communication publiée dans « Colloque "Compétences et socialisation", Montpellier.

Quand	FIA – Mission spécifiques	Objectif	FC – Projets	quand
<i>Tout au long de la formation</i>	Plan de formation individualisé Entretiens individuels (tuteur)	Piloter son projet et « devenir ingénieur »	Plan de formation individualisé Entretiens individuels (Ingénieur formateur) Développement personnel	<i>Tout au long de la formation</i>

<i>Semestre 1</i>	Rapport d'étonnement Bibliographie scientifique	S'intégrer comme technicien supérieur débutant dans l'entreprise
-------------------	--	--

<i>Semestre 2</i>	Mémoire technique	Acquérir une maîtrise technique	Initialisation du programme Étude socio-économique Séminaire 1	<i>Semestre 1</i>
	Le projet de formation individualisé	Prendre du recul par rapport au technicien		
<i>Semestre 3</i>	Etude scientifique et Technique	Acquérir une démarche scientifique	Étude scientifique	<i>Semestre 2</i>
<i>Semestre 4</i>	Mission à l'étranger Projet d'approfondissement et de modélisation scientifique	Prendre son autonomie	Projet industriel collectif Séminaire 2 Séjour linguistique	
<i>Semestre 5</i>	Projet industriel	Prendre la responsabilité d'un projet	Projet individuel (stage) Complément de formation individualisée	<i>Semestre 3</i>
<i>Semestre 6</i>	Projet industriel Compléments de formation individualisée	Accomplir une « Mission d'ingénieur »	Projet individuel (stage) Complément de formation individualisée	<i>Semestre 4</i>

Les deux cursus (FC et FIA) s'appuient sur ce principe organisateur unique : passage du « technicien » à « l'ingénieur ».

Comme on peut le noter sur ce tableau les FIA doivent s'intégrer comme technicien supérieur lors de la première année, pour se remettre en question en tant que technicien vers la fin de cette année. Les FIFC au début, qui sont généralement des techniciens, doivent prendre du recul par rapport au technicien dès leur entrée à l'école.

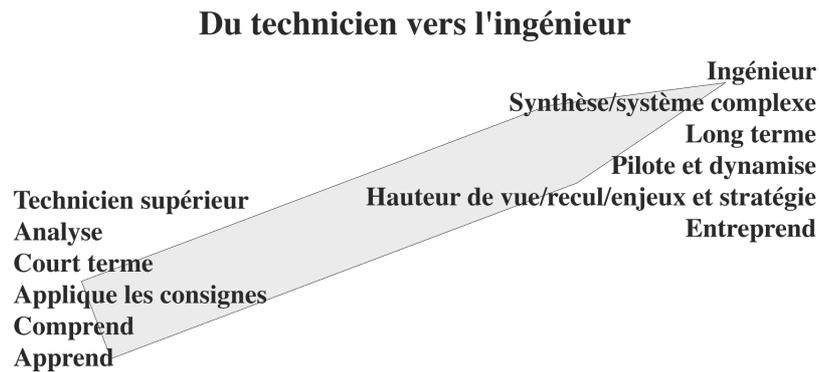


Figure 1. Schéma des compétences de l'ingénieur et du technicien

Le « technicien » est considéré comme un cadre n'ayant qu'une vision unidirectionnelle des problèmes. Il conçoit des solutions techniques. Il exécute ce qu'on lui demande.

L'« ingénieur » dispose d'une vision plus large, intégrant des dimensions techniques, économiques, organisationnelles et humaines. Il propose et négocie des solutions.

Passer du technicien à l'ingénieur suppose : élargir sa vision, prendre du recul par rapport au problème posé pour l'étudier dans ses différentes dimensions, agir d'une manière autonome, argumenter et négocier ses propositions.

5. L'approche par problèmes (l'APP) :

L'APP est une méthode d'apprentissage basée sur le principe d'utilisation d'un problème comme point de départ pour l'acquisition et l'intégration de nouvelles connaissances (Barrows, 1982)⁸.

8 - Cité par Galand et Frenay (2005)

C'est une approche développée par les enseignants à la Faculté de médecine de l'Université McMaster au Canada vers les années soixante-dix. Elle est née du constat de l'ennui et de la passivité des étudiants face à la grande quantité d'informations qu'ils reçoivent dans les cours magistraux, d'une part, et à leur enthousiasme lorsqu'ils se retrouvent en stage, d'autre part.

L'enseignement de la médecine comprend généralement une à deux années de cours magistraux de sciences de base (biologie, chimie, physiologie, anatomie, etc.) avant que l'étudiant ne commence sa formation clinique dans les hôpitaux, où il suit d'abord une série de stages obligatoires ensuite des stages de spécialisation au choix. Les cours magistraux se déroulent selon un mode conventionnel dans de grands auditoriums.

L'APP en médecine est une méthode d'enseignement basée sur l'utilisation de cas de patients (patient problems) comme contexte, dans lequel l'étudiant apprend les sciences de base et les cours cliniques en développant sa capacité à résoudre des problèmes cliniques (problem solving skill).

Dans cette approche, le problème est présenté avant que l'étudiant ait appris les concepts cliniques et les sciences de base qui s'y rattachent.

Dans cette approche, les étudiants travaillent en petits groupes à partir d'une situation-problème ou d'un projet multidisciplinaire, encadré par un tuteur. Celui-ci n'enseigne plus, il a un rôle de guide. Selon le terme officiel de l'APP, le tuteur a un rôle de facilitateur d'apprentissage.

La méthode d'APP fait appel à la coopération entre apprenants et offre une certaine autonomie aux étudiants. C'est une méthode centrée sur l'étudiant plutôt que sur l'enseignant. C'est l'étudiant qui agit, l'enseignant l'accompagne dans son activité. Les situations sont variées, contextualisées et présentent un défi.

6. Les sources d'inspiration de l'APP :

L'APP est une méthode active d'apprentissage, dont les racines remontent, selon Schmidt (1993), à Dewey. Celui-ci fut, dans les années 30, l'un des premiers à considérer que la connaissance ne se transfère pas telle qu'elle, mais que l'apprentissage requiert une participation active de l'apprenant. Avec son « école laboratoire », il développe une méthode d'enseignement où les élèves construisent des connaissances par confrontation à des

problèmes qu'ils peuvent rencontrer dans la vie réelle⁹. Dewey (1990) conçoit que les capacités d'apprentissage se développent chez l'enfant lorsqu'il est indépendant.

7. Introduction de l'APP au CESI :

Le CESI a introduit l'approche par problèmes (APP) comme méthode pour apprendre dans deux formations : à l'eXia.CESI et chez les FIA.

Cette méthode s'insère dans un large éventail d'approches pédagogiques dont les principaux sont la pédagogie de l'alternance, la pédagogie du projet et l'approche par les compétences.

7.1. L'APP à l'eXia.CESI :

L'APP est adoptée à l'eXia.CESI comme méthode pédagogique pour former à un métier ou une activité, elle fut initiée en 2004 au sein de l'école supérieure d'informatique du CESI (eXia).

A l'eXia, l'APP se présente comme un dispositif curriculaire de formation des informaticiens par les situations. Pour l'eXia.CESI, l'approche APP est développée en partenariat avec l'UQAM (Université du Québec A Montréal). Cette méthode vise à plonger les étudiants dans des situations réelles d'entreprises, afin de développer les compétences dont ils auront immédiatement besoin dans leur vie professionnelle. L'école fonctionne sur le modèle de l'entreprise tant du point de vue de l'organisation, de la formation que du professionnalisme attendu de chacun. Un groupe d'élèves reçoit une commande d'un client, d'une entreprise, et la réalise dans les conditions de fonctionnement d'une entreprise. La méthode APP est exploitée dans ce cadre. C'est une méthode active de formation qui s'appuie sur la RDP proches des intérêts des élèves. Pour Yves Mauffette (Vice-Recteur de l'UQAM) « on n'apprend réellement qu'en pratiquant. La connaissance pure n'est pas visée, c'est la compétence qui est recherchée et avec elle les capacités d'agir ». Cette méthode s'insère dans la pédagogie du projet professionnel. Celui-ci constitue l'épine dorsale de la formation de chaque élève.

A travers des groupes de travail et des mises en situation, les élèves acquièrent non seulement des compétences techniques en informatique, mais aussi les méthodes et les comportements nécessaires à la vie professionnelle.

9 - L'école Freinet est aussi citée comme source de l'APP.

Lorsque l'élève est en stage en entreprise il fonctionne selon les principes de l'APP.

Pour Yves Mauffette (2011), un des initiateurs de l'APP à l'eXia, « L'enseignement ne consiste pas juste à communiquer des contenus et ce, pour toutes les disciplines. On se doit de former des étudiants à devenir curieux, autonomes, responsables et même passionné pour un sujet, des étudiants qui auront le goût d'apprendre à apprendre. L'exercice est, avant tout, de reconnaître ses forces et ses faiblesses face à sa discipline et surtout d'apprendre à accepter à accéder à l'information manquante »¹⁰.

7.2. L'APP au centre de Bagnaux :

A Bagnaux, l'APP est exploité à une échelle plus modeste. Il s'agit en fait d'un module complémentaire au cours de thermodynamique. Au moment où nous avons abordé cette étude, l'introduction de l'APP dans l'apprentissage scientifique (d'une discipline) était à l'état expérimental.

7.3. Une expérience similaire à celle de l'eXia : la réforme Candis 2000 à l'UCL

L'Université catholique de Louvain (UCL) a procédé en 2000¹¹ à une réforme pédagogique dans la formation universitaire d'ingénieurs fondée sur l'APP, baptisée *Candis 2000*, calquée sur le modèle de l'APP utilisé dans les facultés de médecine au Canada. Cette expérience de l'UCL est très proche de celle de l'eXia.CESI. L'APP est appliqué à l'ensemble de la formation dans cette école.

7.4. Quelques études sur les effets de l'APP :

Les études sur les effets de l'APP portent principalement sur son application aux domaines des sciences médicales en Amérique du Nord. Les études qui font autorité sont celles menées par Norman et Schmidts (1992).

En dehors de ces domaines, il y a très peu d'études sur ce sujet, et quand elles existent, elles manquent de rigueur. C'est ce que notent l'équipe de chercheurs de l'UCL (Galand et Frenay, 2005).

Par contre il existe beaucoup d'écrits qui vantent les mérites de l'APP et de ses effets bénéfiques sur les apprentissages. Le plus souvent, les études sur les effets de l'APP se font

10 - Yves Mauffette (2011), fiche de présentation de la pédagogie de l'école eXia.CESI

11 - Voir Galand et Frenay (2005).

par enquête auprès d'enseignants et d'élèves, et sont réalisées par des intervenants impliqués dans la mise en place de l'APP. Ce qui est le cas par exemple d' Yves Mauffette qui a participé à la mise en place de l'APP dans l'enseignement et la formation professionnelle. Dans ce contexte, on ne peut qu'être favorable à l'APP.

Par ailleurs, la méthodologie utilisée pour évaluer l'apprentissage selon le mode traditionnel n'est pas adaptée à l'évaluation de l'APP. C'est l'une des grandes préoccupations de l'équipe de l'UCL. De plus l'introduction de l'APP dans d'autres domaines que les sciences médicales est récente. On n'a pas suffisamment de recul pour l'évaluer valablement.

7.5. Quelques résultats en bref sur les effets de l'APP :

Les effets de l'APP dans les domaines des sciences médicales :

Les études menées par Norman et Schmidt (1992) indiquent un grand degré de satisfaction chez les étudiants qui ont choisi la voie de l'APP. Ces deux auteurs, distinguent l'effet de l'APP sur l'acquisition des connaissances, de son effet sur l'intérêt pour l'apprentissage et sur les performances liées à un domaine. Ils ont observé chez les médecins, issus des mêmes Facultés, engagés depuis longtemps dans la vie professionnelle un déclin qui n'était pas lié à une mémoire déficiente mais plutôt à une incapacité à acquérir de nouvelles connaissances. Autrement dit, l'APP lors des études, n'est pas transposé après dans la vie professionnelle. Ce qui est en contradiction avec la pratique dans bon nombre d'Hôpitaux en France par exemple, où les médecins débattent souvent en groupe d'un cas inédit qui pose un problème de diagnostic ou de traitement.

Les effets de l'APP dans la formation des ingénieurs de l'UCL :

L'expérience de Louvain a été évaluée par une équipe de chercheurs dont les résultats ont été publiés dans un ouvrage sous la direction de Benoît Galand et Marianne Frenay (2005). Dans cet ouvrage collectif publié sous la direction de ces auteurs, les participants à cet ouvrage tentent de rendre compte sous différents angles, de l'impact de l'expérience de mise en œuvre de l'APP dans la formation universitaire d'ingénieurs à l'Université catholique de Louvain (UCL).

Dans les points négatifs, les auteurs signalent

- des difficultés liées à la mise en place de l'APP (problème de cohérence du programme, surcharge de travail, satisfaction moindre)

- une perception négative des enseignants et un engagement moindre de leur part.
- une baisse des notes et des performances des étudiants par rapport à la maîtrise de la matière.

Les difficultés liées à la mise en place de la réforme semblent liées aux deux derniers points précités

Par rapport aux points positifs, les enseignants et les membres de jury de projets ont noté que les étudiants ont accompli des choses que personne n'aurait cru qu'ils seraient capables d'accomplir.

Selon cette étude, l'APP a tendance à niveler les différences entre étudiants ayant des notes élevées et ceux ayant des notes moyennes, ou celles entre étudiants et étudiantes. Ce qui est probablement un effet de la nécessité de coopérer pour réaliser un projet ou résoudre un problème. Par contre, ces effets n'accroissent pas ces différences mais n'ont pas tendance à les supprimer non plus.

L'effet positif notable est que l'APP participe beaucoup plus au développement des compétences qu'au transfert des compétences.

L'étude des effets de l'APP sur les acquisitions des élèves, révèle surtout que les étudiants ont développé des capacités de résolution de problème et aussi des connaissances théoriques (voir chap. 7). Les résultats tendent à indiquer que l'APP a un impact positif sur la qualité des apprentissages des étudiants.

Les effets de l'APP à l'eXia.CESI :

L'APP est actuellement appliquée en France dans divers domaines, dans l'enseignement général comme dans la formation professionnelle et est pratiquée de différentes manières. Elle est introduite comme méthode d'apprentissage ou comme approche pédagogique appliquée soit à l'apprentissage d'une théorie, soit à l'apprentissage d'un métier ; à une séquence d'apprentissage sous forme de travaux pratiques par exemple ou à tout le programme d'enseignement ou de formation. Galand et Frenay signalent qu'en raison du fait que l'APP recouvre actuellement une grande diversité de pratiques et de dispositifs pédagogiques, il est difficile, pour le moment, d'établir des variables comparatives pertinentes.

De ces différentes études on n'apprend rien sur le processus d'apprentissage par problème dans les différents domaines ni dans ces différentes formes d'application. On peut faire l'hypothèse que l'apprentissage par la méthode APP n'est pas le même selon qu'elle est appliquée à l'apprentissage d'un métier ou d'une activité (exemple de l'eXia et de l'UCL) ou à l'apprentissage d'une théorie (exemple des FIA à Bagneux).

Chapitre 2

L'analyse de la tâche

L'analyse de la tâche est un préalable incontournable pour l'analyse de l'activité. Elle vise généralement deux objectifs :

- décrire ce qui doit être fait, autrement dit le but ;
- préciser comment le faire, dans quelles conditions et avec quels moyens.

Les données, nécessaires à l'analyse de la tâche, proviennent de trois sources principales :

- le guide de l'étudiant d'APP.
- la documentation fournie aux élèves ;
- les traces audio de trois entretiens successifs avec l'enseignante qui ont été retranscrits intégralement.

L'entretien avec l'enseignante et la documentation fournie aux élèves nous ont permis de cerner le but de la tâche, c'est-à-dire ce qu'il faut comprendre et expliquer : le processus de rafraîchissement de la boisson. Celui-ci est représenté par un modèle que l'enseignante a validé à l'issue des trois entretiens. Nous l'avons appelé le modèle de fonctionnement du système de l'enseignante.

Pour construire ce modèle, il faut construire une représentation de la géométrie de la canette articulée à une représentation du processus. Celle-ci fait appel à des connaissances en thermodynamique, dont une partie est à construire lors de la réalisation de la tâche. Les élèves ne connaissent pas tous les phénomènes en jeu dans le processus de la canette. L'enseignante conçoit ce module d'APP comme un complément au cours dispensé avant les séances d'APP. Les élèves doivent acquérir par eux-mêmes ces connaissances. C'est le principe retenu de la méthode d'APP.

Quant à la manière dont les élèves doivent procéder pour réaliser le travail, elle est consignée dans le guide de l'étudiant d'APP qui leur est fourni.

1. Les ressources documentaires pour réaliser la tâche :

La documentation fournie aux élèves

Elle est constituée par un article d'une revue de vulgarisation, des dictionnaires usuels, une documentation technique à consulter sur le site de l'INPI et celui de Thermagen, la société qui a inventé la canette et une documentation scientifique disponible sur le site des « Sciences et techniques de l'ingénieur ».

Au cours de la première séance, les élèves n'ont droit accès qu'à l'article de la revue et aux dictionnaires usuels. A partir de la deuxième moitié de la deuxième séance, ils ont accès à la documentation technique et scientifique.

1.1. Le guide de l'étudiant d'APP : (cf. guide détaillé en fin de chapitre)

Ce guide fixe les étapes de réalisation de la tâche et donne des indications sur la manière de procéder. La tâche principale est décomposée en plusieurs sous-tâches ordonnées chronologiquement. À chaque sous-tâche correspond un sous-but propre. Dans l'esprit du concepteur de la tâche, l'ordre d'exécution des sous-tâches correspond à une planification de la tâche d'apprentissage. C'est une planification logique, dans laquelle chaque sous-tâche prépare la suivante et la conditionne.

Les étapes que doivent respecter les élèves dans la réalisation du travail sont les suivantes :

1. Clarifier les termes et les données dans l'énoncé du problème.
2. Définir le problème
Dresser la liste des éléments et des phénomènes à expliquer.
3. Expliquer le problème + exemples.
4. Discuter et organiser les explications proposées.
5. Formuler les objectifs d'apprentissage
6. Etude individuelle / Activité étude et recherche (AER).
7. Mettre en commun les connaissances acquises, et les appliquer au problème pour en tirer des explications.
8. Restitution et évaluation

Chaque étape doit donner lieu à une production écrite des élèves, dont une copie est remise à l'enseignante.

1.2. Le texte de l'article de la revue est le suivant :

Texte intégral de l'article :

La canette auto rafraîchissante

Du phénomène de rafraîchissement de l'eau d'une jarre d'eau au principe de transfert thermique en thermodynamique, en passant par la canette autorafrâichissement à céramique.

La canette auto rafraîchissante :

A l'intérieur de la canette un échangeur thermique :

Cette canette baptisée GLACE, repose sur le même phénomène que celui de la cruche en terre cuite. En s'évaporant la pellicule d'eau qui se forme sur la surface de ces conteneurs extrait de la chaleur qui va se reposer ailleurs par condensation. La comparaison avec le principe mis en œuvre par Thermagen s'arrête là. Tout se passe à l'intérieur. L'emballage enferme un échangeur thermique contenant un centilitre d'eau sous vide. Au contact thermique de la boisson l'eau se vaporise. « Sous vide, on peut faire bouillir de l'eau à 0°C », rappelle Fadi Khairallah. L'eau, en s'évaporant sous basse pression, extrait les calories de la boisson. Reste à les évacuer. C'est là qu'entre en jeu le dessicant. Il s'agit d'une céramique technique conditionnée sous vide, séparée de la boisson et qui communique avec l'échangeur thermique par une valve. Lorsque le consommateur appuie sur une sorte de bouton poussoir, au fond de la canette, un mécanisme déclenche l'ouverture de la valve. Le dessicant agit alors comme une pompe à vapeur. La vapeur d'eau est absorbée. Les calories ne disparaissent pas. Elles sont simplement déplacées de la boisson vers le fond de la canette. Résultat : cette canette auto-rafraîchissante refroidit une boisson de 15 à 18°C en moins de cinq minutes.

Sur le papier le procédé de rafraîchissement paraît simple. En pratique, il a fallu étudier la géométrie de l'échangeur pour maximiser sa surface d'échange thermique avec la boisson et choisir les matériaux appropriés. Pour cela Thermagen a étroitement collaboré avec le CEA pour la validation et la caractérisation des matériaux ainsi que pour optimiser le transport thermique. Dans le cadre d'un programme de transfert de technologie, elle a fait appel aux techniques de simulation numériques développées par l'Agence spatiale européenne. Ces outils de simulation étaient indispensables pour observer le processus d'évaporation de l'eau sous vide et sa circulation afin de comprendre toute la problématique thermique qui s'ensuit, observe Fadi Khairallah. Durant toute la phase de conception, Thermagen a gardé à l'esprit que son emballage auto-rafraîchissant ne serait adopté par les industriels que s'il pouvait être fabriqué en volume et à cadence élevée. L'idée était d'imaginer dès son développement un produit d'industrialisation en grande série sans avoir à reprendre sa copie à zéro.

La canette finale est composée :

- d'un dessicant (céramique technique),
- d'un échangeur thermique
- d'un réservoir de boisson à rafraîchir. »

C'est un article de vulgarisation de l'invention. Il est accompagné d'un schéma présentant la canette en coupe et en perspective. Cet article insiste plus sur le phénomène de l'*adsorption*, sans le nommer. Ce phénomène est décrit comme étant le fait d'une matière utilisée dans la canette, qui est une céramique technique faisant fonction d'un dessiccant technique. D'après l'auteur de l'article, l'invention repose sur ce phénomène. Il explique que l'utilisation d'un dessiccant dans le rafraîchissement d'une boisson fut inspirée aux inventeurs de la canette par le phénomène naturel de la cruche en terre cuite. L'article indique également que le rafraîchissement de la boisson se réalise par l'évaporation d'un centilitre d'eau sous vide, sans trop donner de précision sur le processus même de rafraîchissement de la boisson. L'auteur cite un des inventeurs de la canette qui explique que « Sous vide, on peut faire bouillir de l'eau à 0°C ». L'article indique aussi que l'évaporation sous basse pression extrait de la chaleur à la boisson et que tout le problème est de l'évacuer. C'est là où le dessiccant entre en jeu.

Cet article a pour but de permettre aux élèves de prendre connaissance du processus à étudier et à expliquer. Celui-ci est décrit dans ses grandes lignes sans donner des précisions sur le processus de rafraîchissement de la boisson.

1.3. Les dictionnaires usuels :

Ils ont pour but de fournir aux élèves les définitions courantes des termes utilisés dans l'article.

1.4. La documentation technique et scientifique :

L'accès à cette documentation n'est autorisé qu'à partir de la deuxième moitié de la deuxième séance.

Cette réglementation de l'accès à la documentation est justifiée par le principe pédagogique selon lequel, l'élève, pour acquérir une connaissance activement, doit mobiliser ses propres représentations, et les confronter à celles de ses collègues dans un débat en groupe (ce qui sous-entend l'existence de représentations différentes d'un même objet). Dans ce débat, les élèves sont supposés prendre conscience de leurs propres erreurs et de leurs propres lacunes à l'issue des deux premières séances. La documentation scientifique et technique est supposée combler ces lacunes et corriger ces erreurs. La progression dans la construction du

problème est supposée se réaliser par rectification successive de ces représentations, jusqu'à l'étape finale de la définition du problème. Celle-ci correspond à la solution du problème.

Ces éléments permettent de donner des précisions sur la manière de procéder et sur son fondement pédagogique. Mais ils ne nous fournissent qu'une indication peu précise sur le produit fini, le livrable. Ce sont les entretiens avec l'enseignante, croisés avec la documentation technique et scientifique remise aux élèves, qui nous ont permis de définir avec précision ce livrable.

2. Une tâche principale composée de deux sous-tâches :

La tâche principale est la re-conception de l'objet technique que l'on peut décomposer, conformément à la prescription en deux grandes sous-tâches :

- comprendre et expliquer le fonctionnement du système de la canette ;
- dimensionner la canette.

Comprendre l'objet consiste à construire un modèle de son fonctionnement. Pour analyser cette activité de compréhension il faut disposer d'un modèle objectif correspondant à ce qu'il faut faire, autrement dit, la tâche à réaliser, considérée par son but comme nous l'avons souligné ci-dessus. Ce modèle est fourni par l'enseignante.

Dimensionner la canette se limite ici à faire des calculs des quantités de matières (la quantité d'eau est donnée, la quantité de boisson est à estimer, il faut donc calculer la quantité de dessicant), de la quantité de chaleur extraite de la boisson et de la pression nécessaire permettant d'extraire cette quantité de chaleur.

3. La structure conceptuelle du modèle de fonctionnement du système de la canette

Un système est un ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisés en fonction d'un but. Un système technique est concrétisé sous la forme d'un objet technique, d'une géométrie déterminée. Cet objet technique, en tant que système se caractérise par une unité. La géométrie de l'objet a pour fonction de contraindre les phénomènes en jeu dans le système et leurs interactions à s'orienter vers le but auquel est prédestiné cet objet.

3.1. Forme et géométrie de la canette :

La canette, prête à l'emploi, est constituée de trois cavités. La première, d'une contenance de 33cl, est réservée à la boisson à rafraîchir. La seconde contient une matière sous vide qui stocke la chaleur extraite de la boisson : le **dessicant** technique. Enfin une troisième, disposée entre les deux précédentes : l'**échangeur thermique**, contient 1cl d'eau sous vide. Les deux premières cavités sont séparées par une cloison qui porte l'échangeur thermique. Celui-ci est de forme conique, dont la partie large est fixée sur la paroi séparant le dessicant et la boisson, et le corps plonge entièrement dans la boisson. Cette disposition de l'échangeur est prévue pour favoriser l'**échange thermique** entre l'eau qu'il contient et la boisson à travers ses parois. Pour accélérer cet échange thermique, on a doté l'échangeur d'ailettes pour augmenter sa surface de contact avec la boisson. Ces ailettes lui donnent à la coupe horizontale une forme en étoile (cf. figure ci-dessous).

L'échangeur est pourvu d'une valve disposée sur la paroi le séparant de la cavité du dessicant. Cette valve est reliée à un bouton-poussoir disposé sur la paroi externe de la cavité du dessicant. Ce bouton est destiné à ouvrir la valve lorsqu'on souhaite mettre en marche le système.

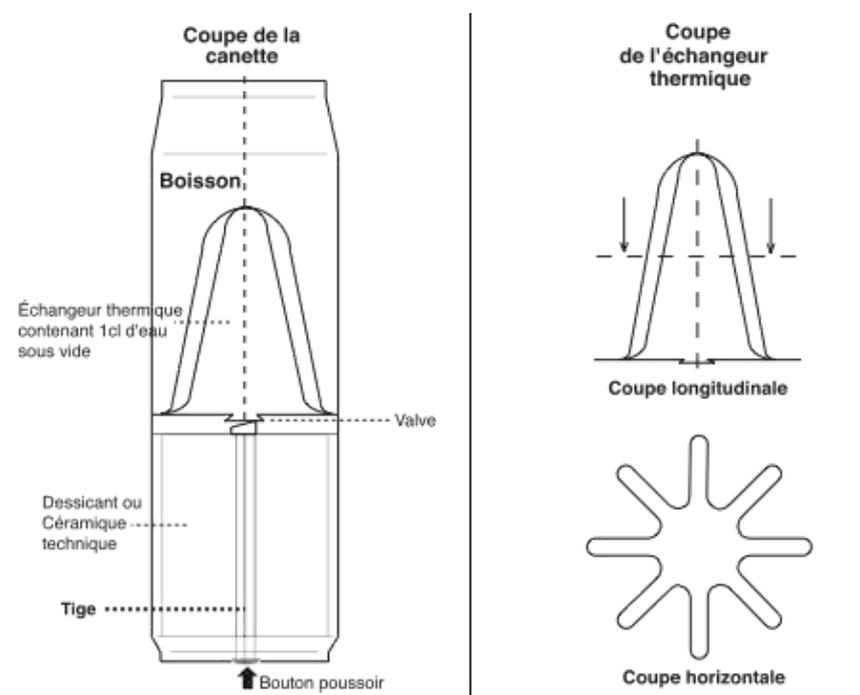


Figure 2. Schéma de la canette

Le dessicant est une matière qui adsorbe l'humidité. La fonction d'**adsorption** est liée à la structure du dessicant. Celui-ci est constitué de petites granules cristallines dont

l'assemblage forme une structure alvéolaire et poreuse. Cette structure lui donne la capacité de capturer la vapeur d'eau dans ses interstices et de la fixer à la surface de ses granules. La capacité d'adsorption varie selon le dessicant utilisé. Dans la canette c'est une zéolite. Celle-ci a une capacité élevée d'adsorption. Ce qui est très avantageux au niveau du poids et au niveau de la quantité à utiliser pour rafraîchir une boisson. L'ensemble échangeur-dessicant fonctionne comme *une pompe à chaleur* (PAC=transfert de chaleur du milieu froid vers le milieu chaud)

Pour éviter que la chaleur qui s'accumule dans le compartiment du dessicant ne brûle pas le consommateur, ce compartiment dispose d'une couche isolante qui le double de l'intérieur et le rend *adiabatique*.

3.2. Le mode d'utilisation de la canette :

L'article remis aux élèves, présente la canette dans la position donnée à gauche dans le schéma ci-dessous.

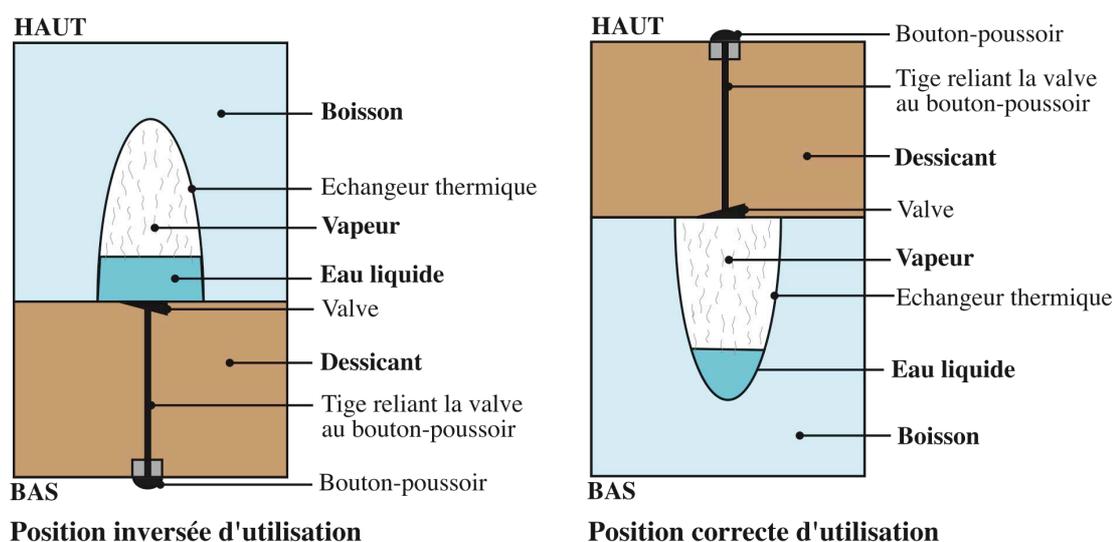


Figure 3. A gauche, la position de la canette dans la quelle les élèves l'abordent.

Les élèves vont aborder l'étude de son fonctionnement dans la position donnée à gauche.

La plupart des brevets déposés qui précisent sa géométrie donnent des schémas de la canette et de l'échangeur présentés dans cette position inversée. (Voir figure 2). Comme nous allons le voir, le système de réfrigération ne peut pas fonctionner correctement dans cette position.

3.3. Le fonctionnement du système de la canette :

Il existe différentes manières d'aborder le fonctionnement de la canette. Nous avons choisi de l'aborder par les phénomènes mis en jeu dans le système de façon à les définir et les expliquer au fur et à mesure. Cela nous permet de mettre en évidence les connaissances à mobiliser pour concevoir le fonctionnement de la canette.

Nous commencerons la description du processus de la canette par le phénomène d'évaporation qui semble être le phénomène sur lequel repose le rafraîchissement de la boisson. L'évaporation est un cas particulier de *changement de phase*. On entend par changement de phase, ou transition de phase, ou changement d'état de la matière, le passage d'un état à un autre. Tout corps peut changer d'état si les conditions de pression et de température le permettent. Il existe trois états de la matière : solide, liquide et gaz. A ces trois états de la matière correspondent six transitions de phase :

La vaporisation (qui inclut l'ébullition et l'évaporation) : c'est la transition d'un état liquide vers un état gazeux

La liquéfaction : C'est la transition d'un état gazeux vers un état liquide

La fusion : c'est la transition d'un état solide vers un état liquide

La solidification : c'est la transition d'un état liquide vers un état solide

La sublimation : c'est la transition d'un état solide vers un état gazeux

La condensation : c'est la transition d'un état gazeux vers un état solide

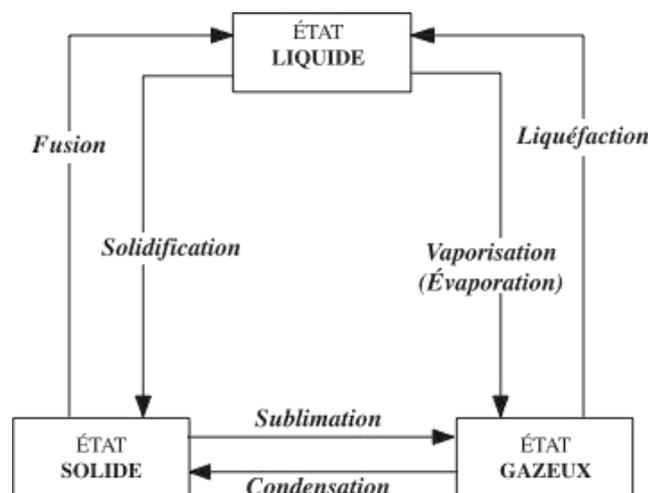


Figure 4. Schéma des six changements de phase

On peut tracer une « carte » des phases, permettant d'indiquer la phase dans laquelle est un système pour des conditions données (pression, température, composition). Une telle carte est appelée diagramme de phase, qui est une représentation graphique à deux ou trois dimensions. Ce diagramme est utilisé en thermodynamique pour représenter les domaines de l'état physique d'un système, en fonction des variables choisies pour faciliter la compréhension des phénomènes étudiés.

La figure 5 ci-dessous présente le diagramme général des changements de d'état possibles de tous les corps existants. La figure 6 présente le diagramme simplifié de l'eau pure (eau utilisée dans la canette). Chaque diagramme indique la relation entre les deux variables principales en jeu dans les différents changements d'états : la température et la pression.

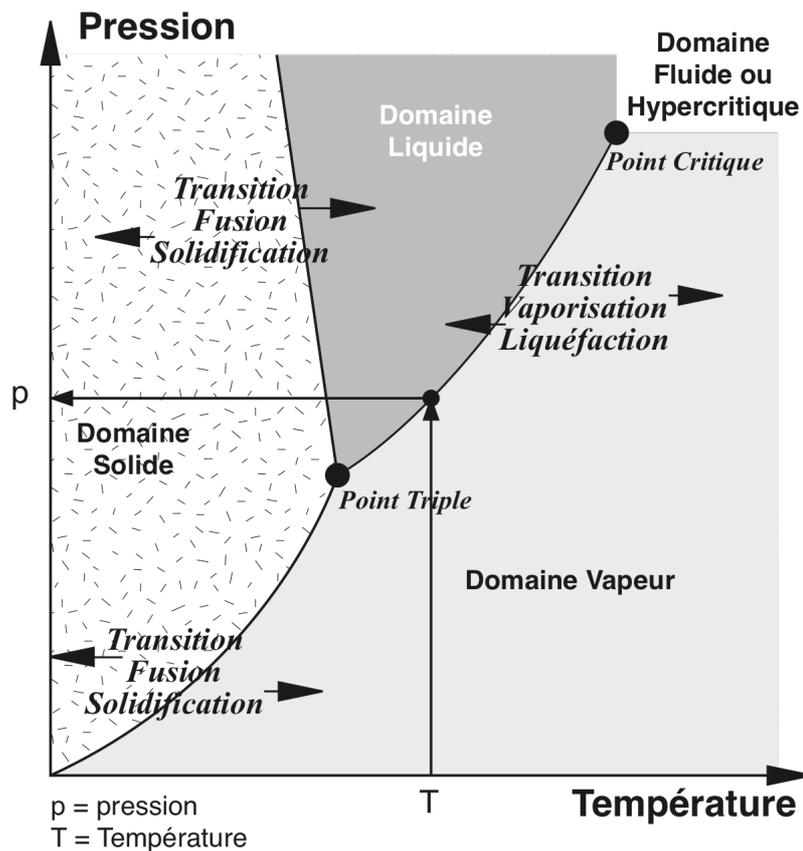


Figure 5. Diagramme général des changements de phases

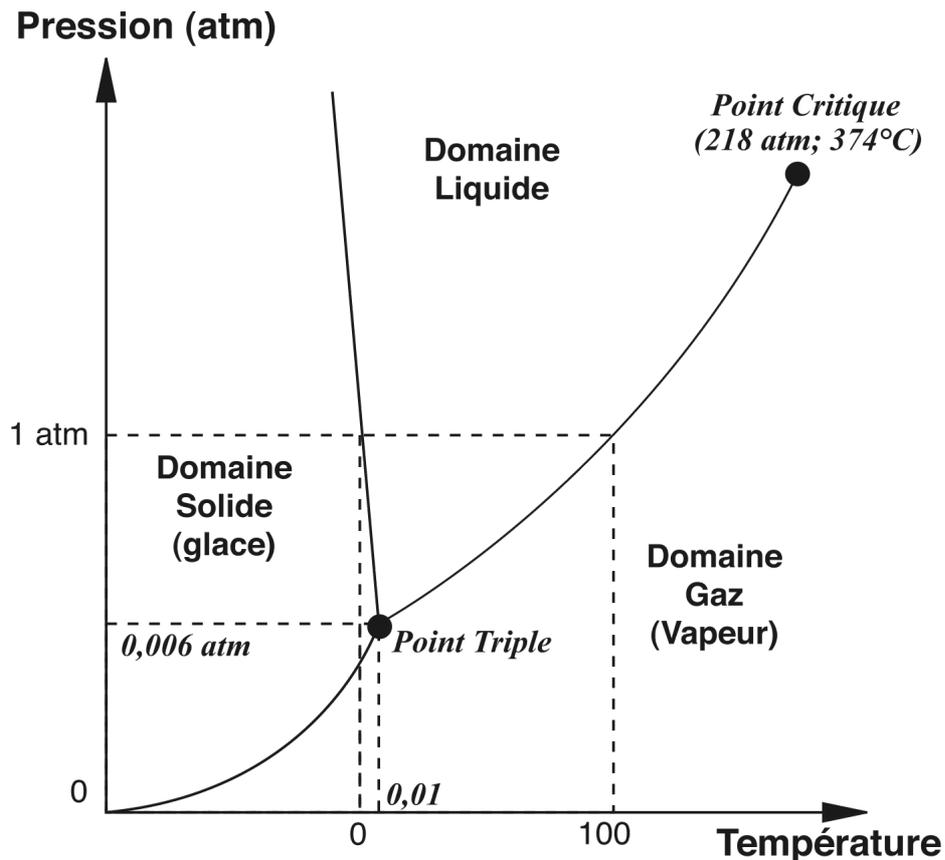


Figure 6. Diagramme des changements de phases de l'eau

Les courbes représentent les états diphasiques. Pour chaque point d'une courbe, une valeur de la température correspond à une valeur déterminée de la pression. On note deux points particuliers : un point critique et un point triple. Au point critique on ne peut plus savoir à quel état se trouve une matière. Au point triple les 3 phases coexistent à une température et une pression données.

Selon ces diagrammes, les changements de phase sont le fait du ***couple pression-température***. Autrement dit, un changement de phase se produit à une température donnée pour une pression déterminée correspondante. La pression et la température sont deux variables qui constituent un couple indissociable dans un changement de phase. On ne peut pas considérer ce phénomène à partir de l'une seulement de ces deux variables indépendamment de l'autre.

Le principe de l'effet du couple pression-température sur les changements de phase est formalisé dans la relation de Clapeyron (voir plus loin l'équation de cette relation célèbre).

La relation de Clapeyron et le diagramme de phase sont supposés permettre aux élèves de comprendre comment s'effectue l'évaporation de l'eau dans la canette. La compréhension de l'évaporation et de l'adsorption est supposée leur permettre d'expliquer le fonctionnement du système de rafraîchissement de la canette.

L'évaporation est une des deux modalités de transition de l'état liquide à l'état gazeux : **la vaporisation**. La seconde est **l'ébullition**. L'évaporation est une vaporisation lente. Le changement d'état se produit d'abord à la surface du fluide et non en profondeur. L'effet de la pression et de la température s'exerce d'abord sur la surface d'un fluide et se propage ensuite vers la profondeur. Ce qui est le cas par exemple de l'évaporation d'une grande masse d'eau à l'état naturel (eau de mer, eau d'un lac, etc.), lorsqu'il y a un changement de pression. C'est un phénomène météorologique. L'ébullition est une vaporisation brutale. L'effet de la chaleur s'exerce en profondeur. La formation de la vapeur se réalise en profondeur, comme c'est le cas dans une casserole d'eau sur le feu.

La pression, dans le cas des changements de phase, correspond à la force, exercée verticalement, d'une colonne d'air sur une surface plane. Ainsi, plus il y a d'air, plus il y a de force exercée, plus il y a de pression. La pression est un phénomène que l'on peut évaluer grâce à un baromètre. C'est aussi une unité de mesure. A l'état naturel, la pression atmosphérique (force exercée par l'air de l'atmosphère) est en moyenne de 1013 hectopascals au niveau de la mer. Cette pression atmosphérique diminue avec l'altitude.

La chaleur est un des trois modes de transfert d'énergie (travail, rayonnement et chaleur)... La chaleur est donc une quantité que l'on évalue avec les mêmes unités que l'énergie (joule). Au niveau microscopique, la chaleur correspond au transfert de l'agitation des particules. Les liaisons entre les particules dépendent de la température d'un corps et de sa pression. Dans le cas des changements d'état, les valeurs du couple pression-température, déterminent l'état d'un corps pur et donc des liaisons interatomiques ou intermoléculaires.

La vaporisation de l'eau à la pression atmosphérique se réalise à une température de 100°C. Si la pression baisse, la température de vaporisation baisse également. Le fonctionnement de la canette se fonde sur les propriétés de changement de phases de l'eau.

3.3.1. L'état initial :

Pour permettre la vaporisation dans la canette à température ambiante, température généralement inférieure à 100°C, de l'ordre de 20° à 35°¹², ses inventeurs ont tout simplement mis sous vide l'eau de l'échangeur. La mise sous vide consiste à extraire de l'air par pompage¹³. Par ce procédé, ils ont réduit la pression dans l'échangeur. Autrement dit, la pression d'évaporation a été calculée en fonction de la température ambiante.

A l'usine, la mise sous vide a été réalisée lors de l'assemblage des composants de la canette à une température inférieure à la température ambiante.

Sortie de l'usine, la canette est exposée à la chaleur ambiante. Lors du contact de la canette avec la chaleur ambiante, celle-ci est transmise à la boisson par conduction. A son tour, la boisson transmet cette chaleur à l'eau de l'échangeur par conduction¹⁴.

La conduction est le transfert d'énergie par contact direct entre deux corps, du corps le plus chaud vers le corps le moins chaud.

L'apport en chaleur provoque la vaporisation de l'eau mise sous vide. Une partie de l'eau s'évapore et l'autre demeure à l'état liquide. L'eau est donc à un état diphasique : gaz plus liquide.

La production de vapeur change l'état de la pression. Dans une enceinte close, l'évaporation d'un fluide a tendance à occuper plus de volume et provoque une augmentation de la pression.

La pression provoquée par la vapeur d'eau produite détermine la pression de vapeur saturante. On a donc deux pressions dans l'échangeur : une pression au niveau de l'eau sous forme liquide, qui est la pression initiale, et une pression au niveau de la vapeur produite qui est supérieure à la pression dans la cavité du dessicant. La production de la vapeur est régulée par la pression qu'elle produit. Si la pression dépasse un certain niveau, le couple pression-température change. Une pression trop forte a tendance à neutraliser le phénomène d'évaporation. Et une descente de la pression a tendance à provoquer une évaporation. Il y a donc une tendance à l'équilibre de la pression de vapeur saturante. Cet équilibre joue un rôle important dans le processus de la canette.

12 - les inventeurs ont tenu compte du fait que le besoin d'une boisson fraîche se ressent plus en période de chaleur, où la température se situe dans cette fourchette.

13 - Ce pompage est réalisé à l'aide de pompe à vide.

14 - Voir plus loin la définition de cette modalité d'échange thermique.

Par ailleurs, les inventeurs ont mis le dessicant sous vide. A l'usine, la pression qui règne dans la cavité du dessicant est égale à la pression qui règne dans l'échangeur thermique. Or nous venons de voir que, suite à la production de vapeur au contact de la chaleur ambiante, cette pression a changé dans l'échangeur. Elle est supérieure à la pression régnant dans la cavité du dessicant. Par contre la température de la boisson et de l'eau de l'échangeur est la même. L'équilibre thermique entre la boisson et l'eau est maintenu tant que la vapeur d'eau est dans l'échangeur.

3.3.2. Le processus de réfrigération :

Il est mis en jeu par le démarrage du système. L'utilisateur appuie sur le bouton-poussoir qui actionne l'ouverture de la valve. La communication entre les deux cavités, de l'échangeur et du dessicant, est établie. Du fait de la différence de pression notée ci-dessus entre la cavité de l'échangeur et celle du dessicant, une dépression se produit à l'ouverture de cette valve. Cette dépression entraîne un déplacement de la vapeur de l'échangeur vers le dessicant. Il faut noter que la dépression n'est pas un phénomène instantané et brusque dans la canette. Nous verrons plus loin que ce phénomène est continu. Lors du déplacement de la vapeur d'eau, la chaleur qu'elle contient est transférée vers le dessicant. Avec le déplacement de la vapeur, la pression de vapeur est éliminée de l'échangeur. L'eau liquide est à nouveau à la pression initiale et à la température initiale. Ce sont les deux conditions initiales d'évaporation. Pour s'évaporer, l'eau puise à nouveau de la chaleur dans la boisson. Ainsi, à l'ouverture de la valve, il y a une tendance à un équilibre thermique entre la boisson et l'eau de l'échangeur, et une tendance à l'équilibre de la pression entre la cavité de l'échangeur et celle du dessicant.

La baisse de la pression dans l'échangeur est compensée par la production de vapeur et l'évacuation de la chaleur par l'apport de chaleur puisée dans la boisson. Ce qui permet à l'état de pression de vapeur saturante d'être maintenu. Celle-ci maintient à son tour une dépression continue.

L'échange thermique est un phénomène qui peut se faire selon deux trois modalités : conduction, convection et rayonnement. Dans la canette, cet échange se fait à la fois par conduction et par convection. L'échange thermique par conduction se réalise toujours par contact direct entre deux corps dans le sens du corps le plus chaud vers le corps le moins chaud. Dans la canette, l'échange par conduction est celui qui a lieu entre la boisson et l'eau à

travers la paroi de l'échangeur thermique. Au cours de cet échange, le transfert d'énergie, c'est-à-dire le transfert de l'agitation moléculaire, gagne en intensité dans le corps le moins chaud. Lorsque cette agitation a gagné la totalité des molécules de la matière du corps le moins chaud, l'équilibre thermique est atteint.

La convection est un échange thermique entre deux corps à distance. Le transfert d'énergie se fait au moyen d'un autre corps. Dans notre cas, c'est l'eau de l'échangeur qui sert, en quelque sorte, de moyen de transport de l'énergie de la boisson vers le dessicant. Dans ce cas, l'échange thermique ne se fait pas nécessairement du corps le plus chaud vers le corps le moins chaud comme dans la conduction. On peut envisager un transfert d'énergie en sens inverse. Mais la géométrie de la canette ne le permet pas. Pour la convection, la seule communication possible avec le dessicant se fait par l'ouverture de la valve. La dépression, qui transporte la vapeur d'eau, ne peut se faire que de l'échangeur vers le dessicant. Donc il n'y a pas de retour possible de la chaleur vers la boisson, ni vers l'eau de l'échangeur. Par ailleurs, le dessicant a cette propriété de capter l'humidité, en l'occurrence la vapeur d'eau, et la chaleur qu'elle transporte. Le dessicant a une structure alvéolaire. Pour que l'adsorption se réalise, le dessicant transforme la vapeur d'eau en liquide. Sous cette forme, l'eau peut pénétrer les alvéoles du dessicant. Cette transformation se réalise grâce aux forces de van der Waals. C'est un phénomène électrostatique au cours duquel les molécules du dessicant attirent et fixent les molécules d'eau. La chaleur contenue dans la vapeur d'eau est libérée dans le corps du dessicant lorsque l'eau devient liquide.

Le transfert d'énergie dans la convection se réalise selon un processus différent de celui dans la conduction. L'énergie thermique contenue dans la vapeur d'eau est une énergie cinétique en raison de l'agitation moléculaire. Celle-ci prend une direction sous l'effet de la dépression. Ces molécules d'eau qui transportent de l'énergie cinétique vont à une vitesse de 1 Mach (1000km/h). À l'arrivée dans le dessicant, le choc provoque la libération de l'énergie thermique dans le corps de cette matière.

On a donc un transfert d'énergie de la boisson vers l'eau et un transfert d'énergie de l'eau vers le dessicant. Le transfert d'énergie de l'eau vers le dessicant a tendance à provoquer un déséquilibre thermique entre l'eau et la boisson. L'échange par conduction entre l'eau et la boisson tente de rétablir cet équilibre thermique.

On a aussi une tendance au déséquilibre de la pression entre l'échangeur et la cavité du dessicant, provoqué par la production de vapeur d'eau dans l'échangeur. Ce déséquilibre de la pression produit une dépression. Celle-ci tente de rétablir l'équilibre de la pression.

Ainsi, chaque phénomène produit une réaction qui a pour effet de produire une autre réaction en retour. Les interactions sont simultanées.

Le processus se poursuit jusqu'à l'épuisement total du cl d'eau contenu dans l'échangeur. Ce processus dure environ 5mn.

3.3.3. L'état final :

L'échange thermique par conduction et par convection a permis d'extraire de la chaleur à la boisson et la transférer vers le dessicant qui l'a stocké. Le rafraîchissement de la boisson est obtenu par ce processus continu. Le consommateur dispose d'une boisson fraîche.

3.3.4. La canette est un système technique :

Un système est un ensemble de phénomènes en interaction. Un système technique consiste en une géométrie couplée à des phénomènes qui sont des transformations. Celles-ci portent sur des matières : la boisson, l'eau et le dessicant.

On distingue trois catégories de système : les systèmes isolés qui n'échangent ni énergie ni matière ; les systèmes fermée, qui échangent de l'énergie mais pas de matière ; les systèmes ouverts, qui échangent de l'énergie et de la matière.

La canette est considérée, pour les besoins d'APP, comme un système isolé qui n'échange pas d'énergie avec l'extérieure.

La figure 7 représente les interactions entre les différents phénomènes en jeu dans la canette lors de son fonctionnement. Ce schéma constitue la structure conceptuelle de la situation que les élèves doivent construire.

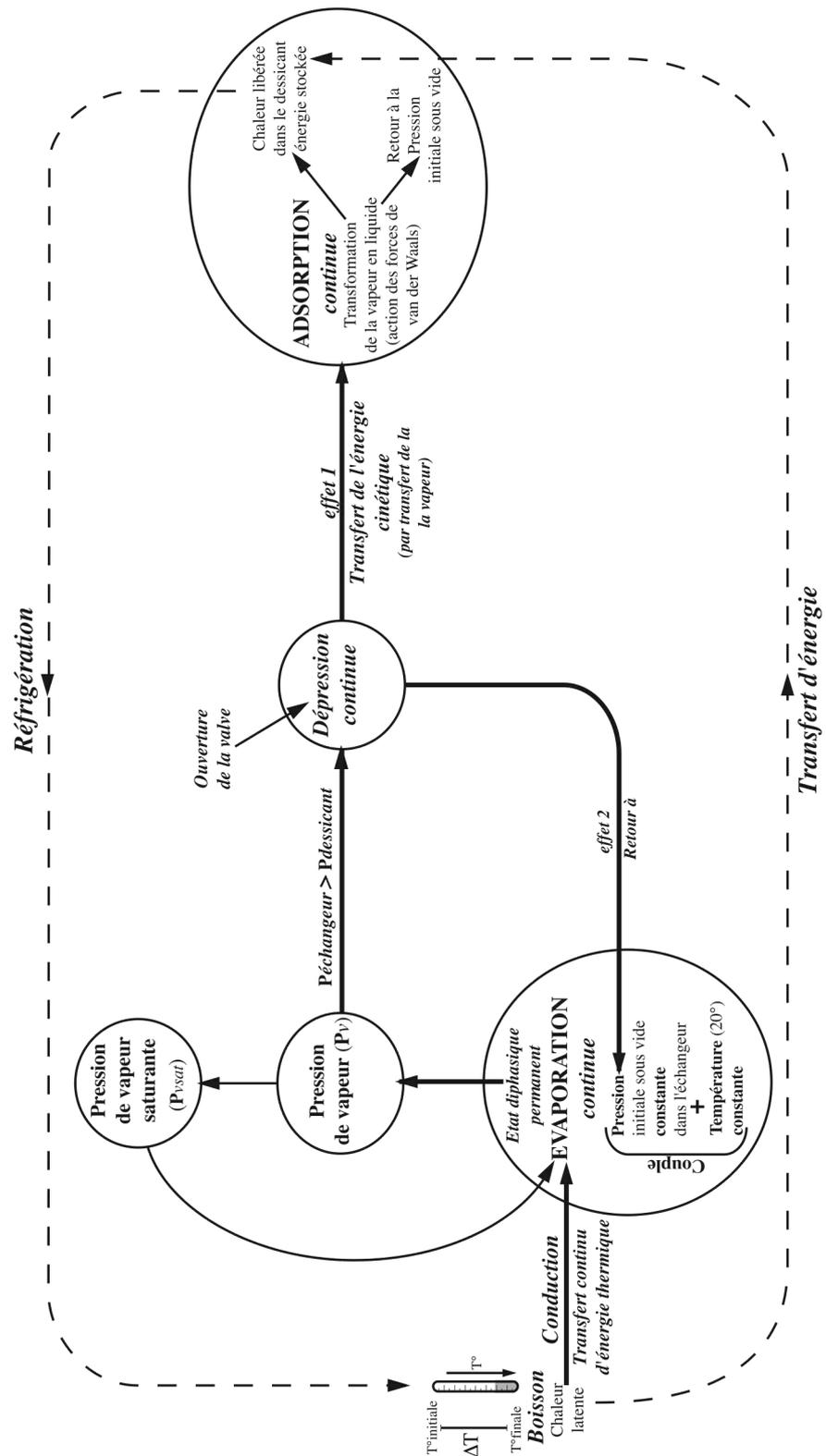


Figure 7. Schéma du processus de fonctionnement de la canette :
Structure conceptuelle de la situation

3.4. Dimensionnement de la canette

Les élèves doivent calculer la quantité de chaleur extraite à la boisson, la quantité de dessicant à utiliser et la pression mise en jeu dans ce processus.

Pour le calcul de la quantité de chaleur extraite, il faut utiliser la relation suivante qui tient compte de la variation de la température ΔT :

$$Q = m.c.(\Delta T)$$

Avec :

Q : Chaleur fournie par la boisson

m : Masse de la boisson

c : capacité calorifique

ΔT : variation de la température

Pour le calcul de la quantité de dessicant, il faut d'abord en choisir un, de préférence celui qui a une grande capacité d'adsorption. Ensuite il faut convertir 1 cl en poids par kg. Un cl d'eau pèse 10g.

Il suffit de multiplier la capacité d'adsorption par la masse d'eau pour obtenir la quantité de dessicant.

Le calcul de la pression fait appel à l'équation suivante, déduite de la relation de Clapeyron :

$$P_{sat} = e^{\frac{M \times L_v}{R} \times \left[\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right] + \ln(P_0)}$$

Avec :

P_{sat} : Pression de vapeur saturante de l'eau (Pa, Bar)

M : Masse molaire de l'eau (g/mol)

L_v : Chaleur latente de vaporisation de l'eau J/kg

T_0 : Température de vaporisation de l'eau à la pression P_0

T : Température vapeur-liquide

R : 8,314 J.k⁻¹.mol⁻¹

La compréhension du principe de base pour concevoir le système repose sur la compréhension des phénomènes en jeu et leurs interactions. Les relations indiquées ci-dessus ne permettent pas de comprendre comment s'effectuent ces phénomènes. Comme le souligne

(Ben-Dov Y., 1995) les phénomènes physiques se racontent avant de se formaliser. Car souvent le formalisme sert à justifier des erreurs. « Il est utilisé par le raisonnement naturel auquel il donne un vernis scientifique » (Closset, 1983)¹⁵.

La production de la canette à l'échelle industrielle nécessite le dimensionnement de la canette et la compréhension du processus.

Dans la conception c'est l'élaboration du modèle du fonctionnement qui prime. La géométrie de la canette qui permet sa matérialisation dépend de ce modèle. Comprendre le fonctionnement de la canette consiste à construire un modèle du processus. Celui-ci prend la forme d'une structure conceptuelle que nous présentons ci-dessous sous forme schématique.

Ainsi, dans une conception on assiste à une articulation entre des phénomènes, une technique et une théorie représentée ici sous forme de relations qui formalisent des concepts qui renvoient à une réalité.

Pour comprendre le fonctionnement de la canette en vue de la concevoir, il est nécessaire de maîtriser les notions soulignées ci-dessus en gras.

3.5. Liste des notions et concepts à mobiliser dans l'explication du phénomène de la canette :

Adiabatique

Mise sous vide

Adsorption

Pompe à chaleur (PAC)

Chaleur latente

Pression

Changement d'état

Pression atmosphérique

Conduction, convection, rayonnement

Pression sous vide

Dépression

Pression de vapeur

Dessicant

Pression de vapeur saturante

Échange thermique

Température

Échangeur thermique

Vaporisation

Évaporation

Variation de la pression (ΔP) et de la température (ΔT).

15 - Closset, 1983, p. 93

ANNEXES

ANNEXE 1

CESI - CEFIPA

Guide de l'apprenti en APP

Christiane RABASSE - Version 1.0 - Diffusion limitée au CESI 31/03/2005

Pensez à vous attribuer les différents rôles

Animateur=il anime les débats, gère le temps et veille au bon déroulement du travail

Secrétaire =il est au tableau et met par écrit ce qui se dit au fur et à mesure, c'est un facilitateur Pour plus de clarté, le tableau est divisé en sections.

Dans la première section, seront inscrites la description du problème et la liste des phénomènes à expliquer.

Dans la deuxième section, la plus grande partie servira à écrire les multiples hypothèses générées à l'étape 3 (Proposer différentes explications des phénomènes). Il faudra en effacer une partie pour arriver à construire une synthèse à l'étape 4 (Organiser les hypothèses).

Lors du déroulement des étapes, les objectifs d'étude sont notés au fur et à mesure sur la partie droite du tableau. L'étudiant secrétaire rend le tableau explicite en utilisant des abréviations, des flèches et des schémas. Il efface le superflu, regroupe, met en évidence. Les objectifs d'apprentissage sont notés au fur et à mesure de leur identification.

Remarque : les textes doivent être notés sans fautes d'orthographe (corrigées par le groupe).

Script= , il remplit ce cahier et organise la restitution

LES HUIT ETAPES DE L'APPRENTISSAGE PAR PROBLEMES¹⁶

En groupe : Prosit aller¹⁷

1. Clarifier les termes et les données dans l'énoncé du problème.

2. Définir le problème

Dresser la liste des éléments et des phénomènes à expliquer.

3. Expliquer le problème + exemples.

4. Discuter et organiser les explications proposées.

5. Formuler les objectifs d'apprentissage

Auto-apprentissage

6. Étude individuelle / Activité étude et recherche (AER).

Bilan en groupe : Prosit retour

7. Mettre en commun les connaissances acquises, et les appliquer au problème pour en tirer des explications.

8. Restitution et évaluation

ÉTAPE 1 : Clarifier les termes et les données dans l'énoncé du problème,

16 - Les huit étapes de l'apprentissage par problèmes (APP) sont adaptées de celles des Facultés de médecine de Limburg, de Genève et de Sherbrooke et utilisées à l'UQAM.

17 - Pro pour problème et sit pour situation

Objectifs

Clarifier des termes inconnus de façon à utiliser la terminologie appropriée.

Définition des mots pouvant porter à confusion dans le texte : (par exemple, êtes vous tous d'accord sur ce que signifie métallurgie, délégué du personnel ?) Indiquez ci-dessous les définitions des mots dont vous avez discuté (et votre référence).

-

ÉTAPE 2 : Définir le problème et dresser une liste des éléments et des phénomènes à expliquer

Objectifs

Établir une description générale du problème, en résumant en une ou deux lignes les différents éléments **importants** (Étape 1).

.....
.....
.....

Formuler une liste des questions à se poser pour répondre au problème posé ; hiérarchiser ces questions.

Il est important de consacrer plus de temps à cette étape, de bien approfondir (une question doit en amener une autre), pensez aux, pourquoi mais vous ne pourrez répondre à toutes ces questions, il faut donc les trier et les hiérarchiser.

Les principales questions sont :

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

ÉTAPE 3 - Expliquer le problème ou formuler les hypothèses

Objectifs

Analyser le problème à partir de la liste des questions soulevées à l'étape 2.

Utiliser connaissances et expériences préalables pour raisonner et proposer des réponses aux questions

Etablir des hypothèses logiques (mais pas nécessairement vraies) sur **les mécanismes sous-jacents**, aux phénomènes identifiés ou des réponses possibles qu'il vous faudra vérifier.

Voici quelles sont les hypothèses que nous faisons :

.....
.....
.....
.....
.....

ÉTAPE 4 : Discuter et organiser les explications et les hypothèses proposées

Objectifs

Conclure le travail de réflexion en faisant une synthèse, qui peut prendre la forme d'une représentation graphique, d'un schéma, d'un diagramme (ex. un arbre de concepts, un diagramme de flux). Là aussi, il s'agit de trier et hiérarchiser ; certaines hypothèses peuvent être regroupés ; peut être que certaines hypothèses n'ont pas besoin d'être vérifiées car tous les individus du groupe sont sûrs de la réponse : départager les connaissances déjà maîtrisées de celles comportant encore des incertitudes

Identifier les incertitudes qui serviront à élaborer les objectifs d'apprentissage.

ÉTAPE 5 : Formuler les objectifs d'apprentissage pour résoudre le problème posé

Objectifs

Etablir la liste des points à étudier (les connaissances qui nous manquent)

Construire un plan d'étude (qui fait quoi ; les réponses doivent être amenées sous quelle forme) **attention dans la** répartition du travail chaque apprenant doit avoir les mêmes compétences à la fin du module

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Prévoir les sources d'information à utiliser

ÉTAPE 6 : Activité étude et recherche (AER)

Objectifs

Réaliser les objectifs d'apprentissage

Recueillir et maîtriser les informations pour expliquer le problème, ou phénomènes, ou valider les hypothèses émises.

Acquérir les compétences et attitudes nécessaires à un apprentissage autonome.

Apprentis

L'apprenant peut utiliser les références suggérées telles que les textes cités, les articles, les ressources informatiques on line, les travaux pratiques, la bibliothèque

Pour rentabiliser chaque étape de travail personnel, l'étudiant s'astreint à la discipline suivante:

- **revoir** la liste des questions d'étude préparée en groupe et l'adapter à ses besoins personnels en formulant de façon précise chaque objectif d'apprentissage;
- **planifier** la période en répartissant harmonieusement ses heures de travail et ses autres activités personnelles;

- **identifier** les sources d'information les plus appropriées; si les références sont à chercher par l'étudiant
- **discriminer** et rejeter rapidement le matériel non pertinent;
- **dégager** l'important en le soulignant, en le reformulant ou en le résumant au besoin
- **inscrire** les points d'ambiguïté pour les discuter en groupe au cours de l'étape 8
- **terminer** l'apprentissage d'un objectif par une synthèse des acquisitions nouvelles; expliquer le problème

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

ÉTAPE 7 : Expliquer le problème en mettant en commun les connaissances acquises par le groupe

Objectifs

Mettre en commun les connaissances acquises pendant l'auto-apprentissage

Expliquer le problème ou le phénomène et validation des hypothèses

Vérifier ou critiquer les notions acquises au cours de l'auto-apprentissage et leur compréhension

Apprentis

Les apprentis font un tour de table sur les ressources utilisées afin de les commenter, les critiquer et partager des découvertes particulièrement intéressantes (quand recherche des ressources).

Le groupe s'entend sur les points à discuter en fonction du temps à disposition. Cette discussion doit être un échange des connaissances acquises et non une lecture de textes ou de notes.

Le problème est « réexpliqué » (en complétant l'éventuel schéma du tutorial, en en construisant un nouveau, ...). Ainsi, les apprentis partagent leurs découvertes, complètent leurs connaissances, vérifient leur compréhension et corrigent, si nécessaire, leur propre explication des processus fondamentaux du problème. Ils en profitent pour formuler et se faire expliquer les points mal compris ou controverses rencontrées au cours de l'auto-apprentissage.

La discussion se termine par une synthèse, qui sera retransmise au cours de la présentation finale

Ces échanges peuvent entrainer de nouvelles questions qui sont à inscrire comme objectifs d'étude complémentaire, pour l'exercice ou comme questions à l'intervenant, si ces points sont bloquants pour le groupe.

Ressources complémentaires proposées pour d'autres groupes de travail

Éventuellement questions à poser à l'intervenant:

ÉTAPE 8.1 : Restitution et évaluation

ÉTAPE 8.2 : Faire un bilan individuel et de groupe

Objectif :

Etablir un bilan individuel: synthèse du problème et identification des lacunes. À l'issue du bilan, chaque étudiant inscrit les objectifs bien maîtrisés et les sujets à compléter, en notant les meilleures ressources d'auto-apprentissage

CADRE EXPLORATOIRE POUR LE BILAN DE GROUPE

Contenu: Avez-vous atteint les objectifs ? Les notions apprises vous sont-elles claires ?

Processus: Avons-nous suivi les étapes de l'APP ? Est-ce que les tuteurs et animateurs ont bien joué leur rôle ? Est-ce que le temps accordé à chaque étape était adéquat ? Comment étaient les interactions dans le groupe ?

Climat: Le sujet vous a-t-il intéressé ? Est-ce que chacun a pu s'exprimer ? Le groupe a-t-il collaboré efficacement ?

Chapitre 3.

Problématique et cadre théorique

Qu'est ce qui se passe, quand un élève ingénieur du CESI de première année, essaie de comprendre un objet technique inconnu en situation d'APP ?

Nous partirons de l'APP tel qu'il est organisé dans le module d'apprentissage de la thermodynamique pour développer notre problématique et notre cadre théorique.

1. L'APP observé relève du constructivisme :

À chaque fois qu'un sujet est confronté à des objets nouveaux ou des situations nouvelles, il y a apprentissage. Dans l'apprentissage c'est l'activité propre du sujet qui donne lieu à la construction d'une connaissance. D'où le principe constructiviste, largement admis actuellement, selon lequel un concept ne se transmet pas, il est construit par le sujet lui-même, et personne d'autre ne peut le faire à sa place. C'est ce qui fonde l'apprentissage en autonomie

L'approche constructiviste place l'activité cognitive du sujet au centre du processus d'apprentissage. Elle préconise la possibilité de construction des connaissances par l'activité du sujet et des expériences qu'il mène sur l'environnement physique et social. Cette activité est motivée par un besoin d'adaptation à l'environnement. Le processus d'adaptation est mis en œuvre chaque fois qu'une situation comporte un ou plusieurs éléments nouveaux. Tout organisme s'efforce de s'adapter à son milieu pour survivre. C'est ce qui motive son activité qui apparaît comme une nécessité vitale. Dans cet effort d'adaptation, le sujet parvient, par son activité propre, à dégager les aspects stables et invariants de son environnement physique et social. Ces invariances correspondent à une construction qui s'effectue par un mécanisme d'équilibration qui vise à assurer l'équilibre des relations entre l'organisme et son milieu de vie. Piaget définit l'équilibration comme « un processus conduisant de certains états d'équilibre approché à d'autres, qualitativement différents, en passant par de multiples déséquilibres et rééquilibrations »¹⁸.

18 - Piaget, 1975, *L'équilibration des structures cognitives*, p. 9

Pour Piaget, le résultat de cette activité du sujet qui vise l'adaptation est la constitution ou la réorganisation d'un schème. Celui-ci correspond à « ce qui, dans une action, est ainsi transposable, généralisable ou différenciable d'une situation à la suivante, autrement dit ce qu'il y a de commun aux diverses répétitions ou application de la même action »¹⁹.

Dans le mécanisme d'équilibration qui assure l'adaptation du sujet, deux processus alternatifs et complémentaires interviennent : l'assimilation et l'accommodation.

L'assimilation est l'incorporation des données externes à une structure cognitive existante.

Le sujet a tendance à aborder systématiquement une situation nouvelle en mobilisant, dans un acte d'assimilation, un schème à sa disposition. Dans la confrontation au réel et à l'environnement, l'assimilation est toujours première. Piaget distingue trois types d'assimilation : reproductrice, reconnaitive et généralisatrice. Dans l'assimilation reproductrice, le sujet répète, dans la situation actuelle, une action qui a donné un résultat intéressant dans une situation vécue antérieurement. Dans l'assimilation reconnaitive, le sujet reconnaît les éléments d'une situation connue dans la situation actuelle et tente de lui appliquer le schème correspondant à sa disposition. Dans l'assimilation généralisatrice, le sujet cherche à étendre un schème construit dans un domaine à d'autres domaines.

L'assimilation concerne aussi la relation entre les schèmes. Un schème intègre les éléments d'un autre schème à sa propre structure et réciproquement : c'est l'assimilation réciproque.

La construction que réalise un sujet d'un objet, ou d'une situation n'est pas toujours exacte. Ce qui fait que l'assimilation peut être déformante. Cela correspond à intégrer un objet à son propre point de vue. Cette assimilation déformante est à l'origine des erreurs d'appréciation et d'exécution de l'action. Le sujet tire parti de ces erreurs pour trouver des solutions.

L'accommodation est l'ajustement qui se réalise par modification d'une structure cognitive d'assimilation (d'un schème d'assimilation) aux données externes.

Lorsque l'assimilation échoue, il y a une perturbation qui modifie l'équilibre réalisé entre le sujet et l'environnement. À ce moment, le processus d'accommodation est mis en jeu. Ce processus consiste à transformer l'organisation interne de l'activité du sujet, le schème, pour l'adapter à l'objet ou la situation nouvelle. Dans ce processus, le sujet prend en compte la perturbation et l'intègre par différents moyens régulateurs. Il découvre de nouvelles propriétés qu'il intègre à son ancienne structure. L'accommodation se solde par une rééquilibration ou une équilibration majorante entre les structures du sujet et les données

19 - Piaget, 1967, Biologie et connaissance, Paris, Gallimard, p. 23

externes, d'une part, et entre ces structures elles-mêmes, d'autre part. Dans un état d'équilibre, les structures cognitives sont coordonnées au réel, d'une part, et coordonnées entre elles, d'autre part. Lorsqu'il y a rééquilibration, la modification d'un schème perturbe la coordination interne qui existait entre les schèmes, et conduit à une nouvelle coordination entre ces structures internes. L'assimilation réciproque des schèmes pose un problème et appelle une accommodation réciproque. Autrement dit, la transformation d'un schème, consécutive à la confrontation d'une nouveauté, provoque une transformation de l'organisation interne du système cognitif constitué par les relations entretenues par différents schèmes entre eux.

Le concept d'équilibration constitue la trame de fond de notre cadre d'analyse de l'APP observé. Ce concept permet d'envisager l'APP, comme un processus qui consiste à construire en autonomie, à partir de l'action, des connaissances, par un mécanisme d'équilibration qui s'effectue selon les deux processus d'assimilation et d'accommodation.

Dans ce processus, les déséquilibres constituent des moments où l'on peut, éventuellement, saisir la construction et l'appropriation des connaissances.

2. L'APP observé est un apprentissage en situation didactique :

Un apprentissage, quel qu'il soit, s'effectue dans une situation déterminée. Celle-ci y imprime ses marques. Le déroulement de cet apprentissage et son résultat seront fortement déterminés par la situation. Il varie selon les situations. Par conséquent, pour analyser un apprentissage, on ne peut pas ignorer le rapport qu'il entretient avec une situation et l'impact que celle-ci peut avoir sur ce processus. L'APP observé s'effectue dans une situation particulière qu'il faut prendre en compte.

La théorie de Piaget ne tient pas compte des situations. Lorsqu'il évoque la situation, il se tient le plus souvent à des situations exemplaires, qui n'apparaissent pas reliées à un ensemble organisé de situations. Bien qu'il ait écrit plusieurs ouvrages sur la pédagogie, Piaget ne s'est jamais intéressé à la didactique. En didactique, c'est Brousseau (1998) qui va mettre en évidence le rôle de la situation dans l'apprentissage, notamment celui de la situation didactique.

Brousseau adhère au principe constructiviste dans l'apprentissage tel que Piaget le conçoit.

Il observe que la transmission et l'acquisition du savoir en mathématique sont organisées autour d'une relation liant trois termes : un enseignant, un savoir et un élève. C'est ce qui constitue le triangle didactique classique.

Il se demande comment favoriser l'apprentissage de notions en mathématiques en autonomie, c'est-à-dire en respectant le principe constructiviste.

Dans ce triangle didactique, l'enseignant détient le savoir qu'il transmet à un élève passif. L'élève est supposé ne pas disposer de connaissances. L'enseignant verse des connaissances dans la tête vide de l'élève. C'est le modèle pédagogique de la cruche et du pot. L'accent est mis sur le rôle prépondérant de l'enseignant et de ses capacités à transmettre un savoir. C'est une pédagogie de l'enseignement plutôt qu'une pédagogie de l'apprentissage. Pour appliquer le principe de l'autonomie, cher aux constructivistes, Brousseau modifie radicalement le triangle classique. Dans une première version de son triangle didactique il retire l'enseignant. On a un actant (l'élève), un savoir (objet d'apprentissage) et un milieu (la situation). Le retrait de l'enseignant provient d'une analyse de la maïeutique socratique (Brousseau, 1998) qu'il oppose au processus psychogénétique de Piaget. La maïeutique chez Socrate est une méthode d'enseignement qui permet à l'enseignant, par un jeu de bonnes questions, de faire produire à l'apprenant le savoir visé (Platon, 2008). La responsabilité de l'apprentissage se situe du côté du maître. Pour Piaget, l'enfant apprend en s'adaptant à un milieu. Le savoir construit, se conçoit comme le produit de l'adaptation et se manifeste par des réponses nouvelles qui sont la preuve de l'apprentissage. La responsabilité de l'apprentissage se situe du côté de l'élève. C'est probablement l'observation de l'effet « Diènes »²⁰ qui a amené Brousseau à réviser sa première position et à réfléchir au remplacement de l'enseignant dans le dispositif d'apprentissage par les situations. Brousseau, convaincu de la nécessité de l'investissement de l'enseignant, le réintroduit comme médiateur, dans sa seconde version du triangle didactique. Il conçoit un apprentissage par problèmes choisis par l'enseignant, visant à provoquer chez l'élève des adaptations productrices des apprentissages visés. Le sujet (l'élève) apprend par lui-même (principe constructiviste) en se confrontant à un problème choisi que supporte la situation. Chez Brousseau, l'apprentissage va varier selon les situations. Ce qui est à l'époque une véritable révolution.

20 - L'effet Diènes est issu des résultats de l'application de la méthode proposée par Zoltan Diènes pour la diffusion des mathématiques. C'est une méthode qui exclut totalement l'enseignant du dispositif. Cette méthode postule qu'un bon dispositif d'apprentissage et/ou un bon matériel didactique organisés selon des « lois » psychologiques permettent à eux seuls sans investissement de l'enseignant ou du maître, de produire des apprentissages conséquents. Cela a amené certains enseignants à survaloriser les vertus de la situation au point de se croire assurés de la réussite de cette méthode. Bien entendu celle-ci n'a pas eu le succès escompté, au contraire.

La nécessité d'organiser le milieu pour organiser les apprentissages provient de l'idée que le milieu naturel n'est pas porteur d'intention didactique, de transmission de savoir. Autrement dit, il y a une distinction entre l'apprentissage intentionnel et son corrélat l'institution, et l'apprentissage non intentionnel. La notion d'intention ici a un rapport avec le savoir visé. Mais, Brousseau ne s'est pas intéressé uniquement à une seule facette de la situation didactique, en tant que situation organisée pour faire acquérir un savoir à des élèves. Dans l'apprentissage par ces situations, il a noté aussi que certains apprentissages ne correspondent pas à ceux qui sont attendus. Brousseau introduit une distinction importante entre deux grandes catégories de situations : les situations non didactiques et les situations didactiques.

Une situation non didactique est une situation où l'apprentissage s'effectue sans l'intention de transmettre ou d'acquérir des connaissances, comme lorsqu'on apprend par exemple à marcher, à faire du vélo, ou autre. Le rapport au savoir s'élabore comme un moyen, l'acquisition du savoir n'est pas une fin.

Une situation didactique est une situation qui sert à enseigner. Elle est didactique à partir du moment où un individu (l'enseignant, le formateur, etc.) a l'intention d'enseigner à un autre individu (l'élève) un savoir donné. Pastré associe à la situation non didactique, l'apprentissage incident et à la situation didactique l'apprentissage organisé et institué. Il classe l'APP dans ce dernier type de situation. (Pastré, 2011).

Dans la situation didactique, l'enseignant élabore un problème qui cible un savoir déterminé à acquérir. Il propose ce problème à ses élèves qui se l'approprient. Ces derniers résolvent le problème et construisent la connaissance visée. La connaissance prend le statut de savoir, lorsque l'élève l'énonce et l'enseignant le valide ou l'institue.

Dans la situation didactique il y a une situation adidactique qui est la part de la situation didactique dans laquelle l'intention d'enseigner n'est pas explicite au regard de l'élève. Celui-ci réagit comme si la situation était non didactique. Il prend tout seul des décisions, engage des stratégies qui lui sont propres et évalue leur efficacité tout seul. La situation adidactique résulte de l'interaction de l'élève avec le milieu (ou le problème) en dehors de toute intervention de l'enseignant. Cette situation d'action, de réaction, de formulation, de validation et d'interaction avec le milieu forme la situation adidactique dans la situation didactique.

Brousseau distingue la Situation (a-didactique) d'action (relative à une connaissance), la Situation (a-didactique) de formulation (d'une connaissance) et la Situation (a-didactique) de validation (sociale et culturelle).

Dans la situation (a-didactique) d'action, la connaissance du sujet se manifeste seulement par des décisions, par des actions régulières et efficaces sur le milieu où il est sans importance pour l'évolution des interactions avec le milieu que l'actant puisse ou non identifier, expliciter ou expliquer la connaissance nécessaire.

La situation (a-didactique) de formulation est une situation qui met en rapport au moins deux actants avec un milieu. Leur succès commun exige que l'un formule la connaissance en question (sous une forme quelconque) à l'intention de l'autre qui en a besoin pour la convertir en décision efficace sur le milieu. La formulation consiste pour ce couple d'actants à utiliser un répertoire connu pour formuler un message original, mais la situation peut conduire à modifier ce répertoire. On peut déduire théoriquement et vérifier expérimentalement qu'une formulation « spontanée » de connaissance exige que cette connaissance existe préalablement comme modèle implicite d'action chez les deux actants.

La situation (a-didactique) de validation Une situation de validation est une situation dont la solution exige que les actants établissent ensemble la validité de la connaissance caractéristique de cette situation. Sa réalisation effective dépend donc aussi de la capacité des protagonistes à établir ensemble explicitement cette validité. Celle-ci s'appuie sur la reconnaissance par tous d'une conformité à une norme, d'une constructibilité formelle dans un certain répertoire de règles ou de théorèmes connus, d'une pertinence pour décrire des éléments d'une situation, et/ou d'une adéquation vérifiée pour la résoudre. Elle implique que les protagonistes confrontent leurs avis sur l'évolution du milieu et s'accordent selon les règles du débat scientifique.

Dans l'APP observé, la situation adidactique correspond aux moments où les élèves sont livrés à eux-mêmes, sans personne pour les guider, leur dicter ce qu'il faut faire et qu'ils sont confrontés au problème qu'ils tentent de construire, sans l'aide de personne. La situation (a-didactique) d'action correspond aux moments où les élèves se documentent, font des recherches, décident des thèmes, des priorités, en rapport avec le problème posé. La situation (a-didactique) de formulation correspond aux moments où les élèves tentent de préciser les notions étudiées, de les énoncer, les définir et les préciser. La situation (a-didactique) de

validation correspond aux moments où les élèves ont collecté suffisamment d'informations, formulé les notions et cherchent à les valider, soit par la confrontation aux avis des autres, soit par le recours aux définitions données dans les traités, soit par la confrontation à l'avis de l'enseignante.

Brousseau distingue différentes situations d'apprentissage : didactique, a-didactique et non didactique. Pour utiliser des termes moins techniques, il fait la distinction entre une situation où l'apprentissage est organisé et une situation où il n'est pas organisé. Dans la première, l'apprentissage est institué, dans la seconde il est incident. À l'évidence, l'APP observé correspond à un apprentissage institué, dans une situation organisée à cette fin. L'organisation d'un apprentissage permet d'orienter celui-ci vers l'acquisition d'un contenu spécifique. Ce qui implique une intention de l'institution qui vise un contenu précis. L'APP observé correspond à une situation didactique, construite en vue de transmettre un savoir dans le domaine de la thermodynamique. Du moins c'est l'intention qui est affichée par l'institution. Pour acquérir ce savoir, la situation doit comporter un problème sélectionné par l'enseignant en rapport avec le savoir à acquérir. Dans cet APP, le fonctionnement de la canette auto-rafraîchissante constitue un problème pour les élèves en rapport avec un des domaines de la thermodynamique : la réfrigération. Une situation didactique doit aménager un espace non-didactique pour favoriser l'apprentissage de ce contenu en toute autonomie.

C'est parce qu'une situation comporte un problème qu'elle devient un moment d'apprentissage. S'il n'y a pas de problème, il n'y a pas lieu d'apprentissage. On reproduit le même. Il y a équilibre entre le sujet et le milieu. Dans une situation didactique, le choix du problème à proposer est crucial. C'est le problème qui est premier, la situation sert à l'exemplifier et à lui donner du sens. C'est le problème qui oriente l'apprentissage vers le savoir visé. Dans les didactiques disciplinaires, le but est d'assimiler des domaines conceptuels : les situations servent d'adjuvants nécessaires.

Dans l'apprentissage en situation c'est un sujet réel qui en prise avec une situation particulière réelle qui lui pose un problème. Celui-ci découle de la relation d'un sujet particulier à une situation particulière. Une même situation peut constituer un problème pour un sujet et aucun problème pour un autre. L'existence d'un problème dépend des particularités du sujet, notamment de ses connaissances. Une situation devient problématique en fonction des caractéristiques du sujet, notamment de ses connaissances, et des éléments qui

la composent, autrement dit de son contenu. C'est ce lien entre la situation et le sujet que nous allons aborder maintenant.

3. L'APP observé est un apprentissage d'un contenu spécifique :

Tout apprentissage porte sur un contenu spécifique de connaissances. L'analyse d'un apprentissage ne peut pas faire l'économie de ces contenus. Dans l'APP observé, il y a un problème à résoudre. Ce problème représente un contenu qui renvoie à un domaine spécifique : celui de la thermodynamique et plus spécifiquement de la réfrigération. Tout au moins, le problème posé relève du domaine de la réfrigération.

Quelle théorie et quels concepts pour analyser l'APP observé en tenant compte des contenus ?

La théorie générale de Piaget ne tient pas compte des contenus. C'est Vergnaud, avec sa théorie des champs conceptuels qui va introduire les contenus dans l'apprentissage et le développement. Ce qui constitue une véritable rupture avec Piaget tout en continuant à s'appuyer sur l'apport de celui-ci. Vergnaud n'a jamais parlé de rupture, mais tous les observateurs considèrent que sa théorie des champs conceptuels se démarque nettement de la conception de développement de Piaget en termes de structures qui se succèdent selon un ordre strict. Pastré dit à ce sujet qu'« en introduisant sa théorie des champs conceptuels, Vergnaud se différencie de Piaget » (Vergnaud, 1990b).

Il dit à ce sujet : « *Par rapport à une psychologie cognitive centrée sur les structures logiques, comme celle de Piaget, la théorie des champs conceptuels apparaît plutôt comme une psychologie des concepts, même lorsque le terme "structures" intervient dans la désignation même du champ conceptuel considéré : structures additives, structures multiplicatives.* »

Pour développer sa théorie des champs conceptuels, Vergnaud (1999) emprunte à Piaget les deux concepts de schème et d'invariant opératoire.

Il donne plusieurs définitions du schème :

« *Un schème est une totalité dynamique fonctionnelle* ».

« *Un schème est une forme d'organisation invariante de l'activité pour une classe de situations donnée* ». (Vergnaud, 1999).²¹ Dans cette définition, ce n'est pas l'activité qui est

21 - Vergnaud, 1999, p. 195

invariante, c'est son organisation. Schème et situation constituent un couple indissociable. Pour Piaget, le schème porte surtout sur un objet. Vergnaud n'exclut pas l'objet, mais il met l'accent sur la situation. Vergnaud et Brousseau ne donnent pas le même sens à la notion de situation. Brousseau donne au concept de situation une portée didactique qu'il n'avait pas en psychologie. Vergnaud se limite à la signification qu'elle a en psychologie et en donne une définition plus large, qui couvre l'ensemble des situations. Le concept de "situation" est pris ici au sens que lui donne habituellement le psychologue. C'est une situation construite par le sujet au cours de laquelle les processus cognitifs qu'il met en jeu et les réponses qu'il donne sont fonction de la situation à laquelle il est confronté. Il y a une codétermination : la situation détermine le sujet autant qu'elle est déterminée par lui (Pastré, 1999b).

Pour, Vergnaud, (1990b) le sujet c'est le schème. Il définit le schème comme « *composé nécessairement de quatre sortes d'éléments : un but, qui peut se décliner en sous-buts et anticipation ; des règles d'action, de prise d'information et de contrôle ; des invariants opératoires qui sont des concepts en acte et des théorèmes en acte permettant au sujet de prélever l'information pertinente et de la traiter ; des possibilités d'inférence en situation.* »

Chez Piaget, les deux concepts de schème et d'invariant opératoire sont indépendants. Dans cette définition, Vergnaud intègre l'invariant opératoire comme une composante du schème. L'invariant opératoire constitue la partie fondamentale et conceptuelle du schème. Cette partie conceptuelle donne sens aux actions, aux opérations et aux situations sur lesquelles elles portent. Les situations impriment leur marque au concept. L'invariant opératoire trouve, en partie, son origine dans la situation. Le sens qu'il peut avoir, lui est donné, en partie, par les situations. Cela est valable aussi bien pour le concept commun que pour le concept scientifique. Car un concept n'a de sens que par rapport à la situation dans laquelle il a été élaboré ou acquis. Il en tire des invariants qui ne se limitent pas uniquement aux invariants extraits des situations, mais aussi des actions et des opérations sur ces dernières. Un aspect essentiel de la construction des connaissances consiste à élaborer des invariants opératoires. Ces derniers sont toujours spécifiques à une classe de situation donnée.

L'invariant opératoire est un concept au sens d'entité cognitive. Vergnaud considère, sur le plan cognitif, qu'un concept n'a pas d'existence sous sa forme conventionnelle. Pour l'expliquer, il distingue deux formes de la connaissance : la forme opératoire et la forme prédicative.

La forme opératoire découle en principe d'une action réussie. Elle ne donne pas lieu nécessairement à une forme prédicative. Elle peut demeurer implicite, non accessible à la conscience. Elle se transforme en une connaissance prédicative dans un processus de conceptualisation.

Les connaissances opératoires sont des « connaissances en acte » ou des « concepts en acte » et des « théorèmes en acte ». Pour Vergnaud, la forme opératoire de la connaissance est génétiquement première. Elle constitue la source pragmatique et sémantique des formes prédicatives des concepts aussi bien quotidiens que scientifiques. Pour bien saisir le développement de ces derniers il faut s'intéresser au développement de leur forme opératoire. Vergnaud s'est intéressé tout particulièrement à cette forme opératoire du concept.

Les connaissances prédicatives sont explicites, verbalisables et acceptées par un groupe culturel donné. Par exemple, dans le domaine scientifique, les concepts, les théorèmes, les axiomes et les formules sont des connaissances prédicatives. Dans un domaine technique déterminé, les manuels de référence sont condensés de telles connaissances. Habituellement, on étudie les concepts comme des unités cognitives rattachées en mémoire à un mot. À ces unités, on a tendance à associer une catégorie d'objets possédant des propriétés communes. Ces études considèrent les concepts sous leur seule forme prédicative²². Pour Vergnaud, le concept est toujours lié à une connaissance opératoire. « La connaissance rationnelle est opératoire ou n'est pas. ». Les connaissances prédicatives reposent fortement sur les connaissances opératoires dont elles sont issues. Vergnaud emploie la métaphore de l'iceberg pour les différencier. La forme prédicative de la connaissance ne constitue que la partie émergée de l'iceberg. La partie immergée est constituée par une connaissance opératoire qui repose sur l'invariant opératoire. Sans celui-ci, le concept n'a pas d'existence sur le plan cognitif de concept. La métaphore de l'iceberg éclaire le contenu de nos connaissances et la manière dont elles se construisent. C'est également sous cette forme opératoire que les connaissances sont applicables, mises en œuvre dans des situations données et rattachée à des situations d'action.

C'est par le processus de conceptualisation que l'on peut faire évoluer une connaissance opératoire vers une connaissance prédicative.

Dans cette conception de la construction d'une connaissance Vergnaud articule l'invariant opératoire, et donc le schème, aux situations. L'invariant opératoire et la situation constituent pour lui un couple indissociable. C'est de cette relation dialectique entre l'invariant opératoire et la situation que naissent et se développent les concepts et par extension les connaissances²³.

²² - C'est le cas des études en IA qui cherchent à simuler la pensée humaine, mais la considère uniquement à partir de sa forme explicite.

²³ - La confrontation à la première situation n'aura pour conséquence qu'un effet exemplaire. Le concept sera compris à partir de l'exemple. Dans la construction, on va s'efforcer de retenir le maximum d'informations de la situation pour pouvoir opérer de la même façon sur une situation identique. Cette construction sera proche du prototype de Rosch. Le moineau est le prototype de l'oiseau parce qu'il rassemble toutes propriétés que l'on peut rencontrer chez tous les oiseaux. Mais un prototype n'est pas véritablement un concept. Après la confrontation à

Vergnaud définit le concept comme un triplet : des invariants, des situations, un système de signifiants. Ce dernier constitue le système représentationnel grâce auquel le sujet peut évoquer le concept et l'exprimer. Chaque concept est associé à un domaine spécifique. Dans chaque domaine spécifique, un concept prend un sens par rapport aux autres concepts appartenant au même domaine. Un concept se développe en s'appuyant sur les autres concepts du même domaine. Le sens que peut prendre un concept ne provient pas seulement de l'association d'un ensemble d'opérations à un ensemble de situations. Il comporte aussi et surtout l'ensemble des concepts et des théorèmes qui permettent d'assurer l'intelligibilité des situations.

Les contenus spécifiques de connaissance ne sont pas juxtaposés les uns aux autres. Comme le note Pastré (1994), « *les concepts ne sont pas disposés dans notre pensée comme les pommes dans un panier.* »

Vergnaud considère que « *Les relations entre les contenus de connaissances sont beaucoup plus complexes ...* » Ces connaissances sont organisées en champs conceptuels. Cette organisation ne correspond pas à une partition de ces connaissances. Elle constitue un réseau structuré et enchevêtré de concepts et de situations²⁴.

Pour Vergnaud, l'entité cognitive qu'est le concept, à la base d'un champ conceptuel, n'est pas figée mais en développement. Elle renvoie à une diversité d'expériences et de situations différentes qui vont être à l'origine de la construction, par le sujet, de « formes » ou « variétés » différentes de ce concept. Cette entité cognitive n'a pas d'existence sous sa forme conventionnelle : seuls existent des champs conceptuels.

Ce sont ces différentes caractéristiques qui définissent un champ conceptuel.

Vergnaud clôture sa théorie des champs conceptuels par deux idées principales :

— celle de variété : il existe une grande variété de situations dans un champ conceptuel donné, et les variables de situation sont un moyen de générer de manière systématique l'ensemble des classes possibles ;

— celle d'histoire : les connaissances des élèves sont façonnées par les situations qu'ils ont rencontrées et maîtrisées progressivement, notamment par les premières situations susceptibles de donner du sens aux concepts et aux procédures qu'on veut leur enseigner. » Cela signifie que l'engagement dans un apprentissage ne se fait jamais sans

plusieurs situations, la construction change. On retiendra ce qui est commun aux situations et aux opérations effectuées sur ces situations. C'est le concept qui est né parce que c'est l'invariance qui le fonde.

²⁴ - C'est proche de ce que Pastré appelle la structure conceptuelle d'une situation. Nous reviendrons sur ce concept plus loin.

une connaissance préalable héritée du passé. Et la manière dont on va aborder un apprentissage dépend de la nature de cette connaissance.

Avec la théorie des champs conceptuels de Vergnaud, nous avons une théorie locale qui permet d'aborder l'apprentissage en tenant compte du sujet, de la situation et des contenus. Avec Vergnaud, le développement cognitif devient un processus multilinéaire et contextualisé. Ce qui permet d'envisager l'APP comme une micro genèse. La micro genèse est un apprentissage en situation qui prend en compte la nature des objets à apprendre.

Une microgenèse implique une situation, un problème, un contenu, d'une part, et des étapes qui se déroulent dans le court terme, d'autre part.

4. L'APP observé relève d'une genèse :

4.1. Théorie des genèses conceptuelles :

La théorie des genèses conceptuelles à laquelle nous faisons référence ici est celle élaborée par Pierre Pastré (2005). Elle se situe dans l'approche de la didactique professionnelle dont il est l'initiateur (Pastré, 1988).

Pour cet auteur, tant que l'on a affaire à des situations connues, on est dans un état d'équilibre relativement stable entre celles-ci et les connaissances du sujet.

Pastré (2005) a caractérisé cet état d'équilibre par l'existence d'un modèle du sujet stable adapté à des classes de situations. Dans ce modèle, il distingue, en s'inspirant d'Ochanine (1978), un modèle opératif et un modèle épistémique²⁵. Du fait qu'en didactique professionnelle on s'intéresse tout particulièrement au savoir-faire, c'est le modèle opératif qui est mis en évidence. Dans l'élaboration de ce savoir-faire, ce sont surtout les situations rencontrées dans le travail qui constituent l'objet d'apprentissage. Lorsqu'on fait appel au savoir, c'est uniquement dans la mesure où il est utile pour l'action. C'est la construction d'un savoir-faire qui a le plus d'importance. Généralement, on se préoccupe peu de savoir exactement comment fonctionne un système technique pour le conduire ou l'utiliser. Le modèle épistémique est moins développé que le modèle opératif. Cependant, il faut un minimum de connaissances sur le système pour agir. Le modèle épistémique sert généralement d'appui au modèle opératif dans la constitution d'un savoir-faire. Il peut être acquis, dans le cadre d'une formation, avant la construction du modèle opératif. Lorsqu'il

25 Initialement appelé modèle cognitif en référence à Ochanine.

s'agit d'un apprentissage sur le tas, il est souvent construit en même temps que le modèle opératif.

Un modèle opératif a trois composantes : des concepts organisateurs, des indicateurs et des classes de situations. Les concepts organisateurs sont articulés aux indicateurs, d'une part, et aux classes de situations, d'autre part. L'ensemble constitue une structure conceptuelle de situation. L'élaboration d'un modèle opératif consiste à construire une structure conceptuelle personnelle de situation. Dans ce cas, elle a un caractère subjectif. Dans son aspect objectif, elle correspond à ce qu'il faut apprendre pour être efficace et se situe du côté de la tâche. Mais elle n'a pas d'existence en dehors de l'activité comme pour la structure conceptuelle issue d'une théorie scientifique. Pour l'obtenir, il est nécessaire de faire une analyse de l'activité. Généralement c'est à partir de l'analyse de l'activité des professionnels les plus compétents et les plus expérimentés que l'on extrait la structure conceptuelle objective de situation.

Une structure conceptuelle de situation est composée de concepts organisateurs, de classes de situations dont chacune dispose d'un répertoire de règles d'action et d'indicateurs.

Un concept organisateur résulte de l'extraction de la situation globale, à laquelle un sujet est confronté, les dimensions de cette situation permettant de guider et d'orienter son action.

L'indicateur permet de déterminer la valeur de ces concepts organisateurs pour la situation à laquelle on est confronté. Les indicateurs sont des observables, naturels ou instrumentés, qui « permettent pour une situation donnée d'identifier la valeur que prennent les concepts organisateurs. L'équivalent d'une relation signifiant-signifié relie les indicateurs aux concepts » (Pastré, 2005).

Les classes de situations « permettent d'orienter l'action en fonction du diagnostic effectué » Elles « découlent des valeurs prises par les concepts organisateurs. » (Pastré, 2005).

Le modèle opératif est l'appropriation du sujet, à sa manière, de cette structure conceptuelle de situation. Celle-ci varie selon le niveau de compétence d'un sujet. Lorsqu'on a affaire à un professionnel confirmé, le modèle opératif a tendance à rejoindre la structure conceptuelle de situation objective. Lorsqu'il s'agit d'un novice (un débutant dans le métier ou un apprenant) le modèle opératif en est très éloigné.

Le modèle opératif est défini par un but. Celui-ci permet de sélectionner les concepts organisateurs permettant de faire le diagnostic de la situation à traiter, et d'orienter l'action sur cette situation. Il va donc chercher à établir des relations de signification entre les invariants organisateurs de l'action et les indicateurs qui permettent concrètement de les

évaluer. Il va également permettre de repérer les principales classes de situations de manière à ajuster l'action à ces différentes classes. La conceptualisation s'effectue dans un registre pragmatique.

Le modèle épistémique d'un sujet est constitué de l'ensemble des savoirs dont il dispose pour comprendre le fonctionnement d'un objet. Un modèle épistémique porte sur les propriétés du système ou de l'objet. Il a pour but la compréhension du système. Par exemple, face à un système technique, le registre épistémique permet de répondre à la question : comment ça fonctionne ? Il cherche à identifier les relations de détermination qu'on peut établir entre les principales variables constitutives du système. Il se construit en identifiant dans une situation donnée ses objets, leurs propriétés et leurs relations.

Un modèle opératif et un modèle épistémique sont inséparables et s'articulent l'un à l'autre. Un modèle épistémique peut être explicite, voire scientifique, ou implicite. La construction d'un modèle épistémique peut précéder la construction d'un modèle opératif ou bien les deux sont appris simultanément. Le cas de la construction simultanée des deux modèles est celui que l'on observe dans un apprentissage sur le tas. Le premier cas est celui que l'on observe dans la conduite, la maintenance ou la conception d'un système complexe. Comme le souligne Pastré (2011), dans les situations d'apprentissage de conduite de systèmes techniques très complexes, où le modèle sous-jacent repose sur des corps de savoirs de type technique et scientifique, il n'est pas possible d'imaginer un apprentissage direct par immersion et par l'exercice immédiat de l'activité. Il faut une formation théorique préalable. On apprend la théorie d'abord et l'on passe à la pratique après. Cependant, la pratique ne consiste pas à appliquer le modèle épistémique, mais à construire un modèle opératif à partir de deux sources : le modèle épistémique et l'exercice de l'activité elle-même. L'apprentissage pratique consiste alors à réorganiser le modèle épistémique en fonction d'un but de production concrète d'un objet matériel ou symbolique. On a donc un modèle opératif et un modèle épistémique qui sont tous les deux présents chez le sujet et mobilisés dans une activité quelle qu'elle soit.

Dans sa première élaboration du modèle opératif, fondé sur le couple schème situation, Pastré ne tient pas compte de l'instrument. L'apport de la théorie instrumentale va lui permettre de transformer ce couple schème situation en un triplet : schème-situation-instrument. L'introduction de l'instrument s'est imposé comme une nécessité logique, parce que dans le quotidien comme dans le travail, l'instrument est présent partout. Par ailleurs, la théorie instrumentale met aussi en évidence l'existence de cette double dimension de la connaissance que Rabardel (1995) résume par la formule : « toute activité productive est simultanément une activité constructive ».

4.2. Les moments de genèse :

Lorsqu'on est confronté à une situation nouvelle, l'équilibre est rompu. C'est ce qui arrive, lorsqu'on change d'instrument, d'activité, de métier, ou lorsqu'un sujet remet en question les acquis antérieurs pour les reconfigurer en passant d'un niveau d'abstraction à un autre plus élevé. C'est à ces moments de mutation, de transition d'une situation à une autre, de rupture que va se mettre en place une genèse conceptuelle dans un apprentissage. Cette genèse porte sur les invariants opératoires existants qui fondent l'organisation interne du schème. Pastré (2005) appelle « genèse conceptuelle le processus par lequel un acteur change le niveau d'élaboration des invariants qui guident son action, pour l'adapter à de nouvelles circonstances, dans lesquelles son action doit désormais s'inscrire. Il est obligé de quitter l'état d'équilibre de son ancienne représentation, qui fonctionnait comme quelque chose de préconstruit, et se retrouve en situation de déséquilibre qui est représentatif d'un processus de genèse »²⁶. [...] « Cette idée de genèse conceptuelle suppose que l'organisation de l'activité enchaîne des périodes d'équilibre et de déséquilibre, des moments où c'est le fonctionnement qui domine, des moments où c'est le développement qui prend le dessus. Et dans ce cas-là, une nouvelle exigence d'adaptation conduit à une reconstruction de l'invariance »²⁷.

Cette genèse procède de deux mouvements. Un mouvement qui va de l'extérieur vers l'intérieur, dans lequel il y a deux transformations : une transformation de l'artefact en instrument au cours de laquelle l'action s'ajuste à un objet technique nouveau, et une transformation de soi. Et un autre mouvement, qui va du passé vers l'actuel, où une connaissance développée par le passé se transforme dans le présent. Mais ces genèses ne se réalisent pas de la même manière chez tous, quels que soient la situation, le contenu et les caractéristiques du sujet.

Pour illustrer ces genèses nous allons présenter quelques études empiriques.

4.3. Quelques études empiriques sur les microgenèses :

4.3.1. Microgenèse du réglage d'un instrument :

Vermersch (1976) constate au départ qu'on ne sait pas beaucoup de choses sur l'apprentissage chez l'adulte en général et sur l'apprentissage de l'adulte en situation de formation en particulier.

26 - Pastré et Rabardel (2005), p. 238

27 - Ibid, p. 239

Dans le cadre de sa thèse, il a étudié un apprentissage chez l'adulte en situation de formation. Il s'agit de l'apprentissage du réglage d'un instrument : l'oscilloscope cathodique, par un groupe de techniciens stagiaires, en préparation d'un BTS à l'AFPA.

Dans cet apprentissage, il décide de se limiter à l'étude de la genèse de la conduite, parce qu'une genèse met l'accent sur les mécanismes et la structure de l'activité intériorisée des sujets, et le passage d'une étape à l'autre.

Pour construire sa problématique et son cadre d'analyse de cette activité, il se réfère à la théorie opératoire de Piaget. Mais il estime que cette théorie ne peut être appliquée telle qu'elle est à l'étude de la conduite de l'adulte. Vermersch (1976) considère que la théorie psychogénétique de Piaget suggère l'idée qu'une conduite dans le présent est déterminée par l'histoire, et que pour connaître les différents mécanismes intermédiaires du fonctionnement intellectuel de l'adulte, la voie naturelle est d'étudier comment ils se sont construits à travers l'ontogenèse. Mais Vermersch estime qu'elle est aussi déterminée par les conditions actuelles. C'est ce qui lui permet de faire l'hypothèse d'une micro genèse de la conduite chez l'adulte.

Il fait l'hypothèse suivante : si l'adulte est le point d'aboutissement de l'enfant, il doit disposer de tous les instruments cognitifs que celui-ci a construit lors de sa psychogenèse. En s'appuyant sur la théorie des décalages horizontaux et verticaux de Piaget, il estime que les structures construites au cours de l'enfance et de l'adolescence sont encore présentes chez l'adulte. Pour évoquer ces instruments dans la conduite de l'adulte et mettre l'accent sur leur aspect opératoire, il propose de substituer aux structures cognitives propres aux différents stades le concept de registre de fonctionnement : SM, PO, OC, OF.

Le registre agi, issu du stade sensori-moteur est un registre sans représentation. Avec ce registre, le champ des possibles est limité à ce qui est directement perceptible ou atteignable par l'action. Le champ temporel sera très réduit aussi bien du point de vue de l'anticipation que de la rétroaction, et de la réversibilité limitée à l'exécution matérielle de l'action inverse, ce que J. Piaget a nommé "renversabilité".

Le registre figural, issu du stade préopératoire se caractérise par l'apparition d'une représentation qui imite le réel. Dans cette représentation, le sujet « voit » l'objet ou l'événement qu'il évoque. Ce qui constitue au niveau de la pensée, un instrument très lourd à manipuler capable de très peu d'anticipation avec un champ de possible très réduit.

Le registre concret, issu du stade opératoire concret fait appel à un champ de possibles élargi pouvant dépasser les simples données de fait présentées quoi que restant dans leur prolongement. En d'autres termes, le possible se conçoit à partir du réel. L'avantage de ce registre par rapport aux précédents c'est que le champ temporel est plus élargi. Ce qui permet une anticipation analytique et mobile. Il en est de même pour la rétroaction. La réversibilité

au niveau des actions intériorisées apparaît sous deux formes distinctes inversion et réciprocité, et le sujet peut prendre en compte les transformations et les coordonner.

Enfin, *le registre formel*, issu du stade opératoire formel, fait appel à un champ des possibles qui inclut la formulation d'hypothèses et la combinatoire. Avec ce registre, la démarche s'inverse : désormais on part du possible pour aller vers le réel. Dans ce possible, le sujet peut prendre en compte des propriétés et relations n'ayant qu'une existence virtuelle et/ou hypothétique. L'élaboration d'hypothèses correspond à une extension marquée du champ temporel dans le sens de l'anticipation et de la rétroaction

Vermersch fait l'hypothèse que ces quatre grands registres sont tous disponibles chez l'adulte, à n'importe quel moment. C'est l'hypothèse de la pluralité des registres de fonctionnement chez l'adulte.

Il emprunte également à Piaget sa théorie de l'équilibration pour analyser l'élaboration d'une nouvelle conduite chez l'adulte, lorsque celui-ci est confronté à un objet nouveau. Il fait l'hypothèse que lors de la confrontation d'un sujet à un objet nouveau, il y a un déséquilibre transitoire qui apparaît, suivi d'une régulation de l'action, qui se conclut, dans un processus d'accommodation, par une rééquilibration, qui est une équilibration majorante. Le concept de régulation de l'action appartient à la théorie de l'équilibration que Piaget propose comme cadre d'analyse de la conduite humaine qu'il conçoit comme activité d'adaptation à l'environnement.

L'observation de la conduite de réglage de l'instrument :

Le réglage consiste à manipuler les boutons de l'instrument en se guidant de la réaction de celui-ci qui se manifeste sous forme d'un signal à l'écran. Pour obtenir un signal il faut associer la manipulation rapide de deux boutons déterminés se situant à deux plans différents. Pour régler l'instrument, il faut agir sur les boutons de façon à ajuster les signaux selon une certaine fréquence.

Vermersch observe que ses stagiaires manipulent au début les boutons de l'instrument l'un après l'autre dans le sens de leur disposition horizontale pour obtenir un signal. Ce qui ne correspond pas à la démarche adaptée de réglage. Les sujets ne connaissent pas les fonctions des boutons ni les fonctions de l'instrument. Au bout d'un moment ils découvrent les boutons qu'il faut manipuler ensemble pour obtenir un signal. Ensuite, ils découvrent comment ajuster les signaux en agissant sur les boutons correspondants, pour régler l'instrument. Enfin ils découvrent l'ordre dans lequel ils doivent manipuler ces boutons. À la fin de cet apprentissage, les sujets sont capables d'agir sur les boutons associés dans l'ordre qui

convient, pour un réglage approximatif. Ce réglage approximatif permet d'ajuster les signaux selon des fréquences convergentes. Une fois ce réglage approximatif réalisé, les sujets procèdent au réglage précis et définitif.

L'interprétation de Vermersch :

Vermersch estime, que face à cet instrument nouveau, le sujet ne dispose d'aucun moyen pour agir efficacement. Il mobilise le registre empirique (registre sensori-moteur), registre par lequel le sujet explore l'objet. Au cours de cette exploration, l'action est guidée au départ par l'objet. La régulation débute donc par une phase de tâtonnement. Le sujet tâtonne, c'est-à-dire qu'il effectue des actions au hasard. Cela correspond à la phase du déséquilibre transitoire. Le processus qui entre en jeu est l'accommodation dans laquelle intervient la régulation de l'action.

Progressivement, cette action s'ajuste à l'objet par régulation. Une coordination entre l'action et l'objet est obtenue : une coordination entre les boutons pour obtenir les signaux, et une coordination des signaux obtenus par ces actions pour régler l'instrument. C'est une coordination agie orientée vers l'objet et guidé par celui-ci. Celle-ci se double d'une coordination interne. Lorsque la coordination interne se réalise, la perspective s'inverse. L'action est guidée de l'intérieur, ce qui permet au sujet d'anticiper sur les réactions de l'objet et de ne plus agir au hasard.

Vermersch note deux stratégies qui varient avec le niveau d'abstraction : dans la première, le sujet ne retient que les propriétés des éléments de l'instrument (propriétés des boutons), sa stratégie se fonde sur les fonctions des boutons (les composants) ; dans la seconde, le sujet retient les propriétés de l'instrument, sa stratégie se fonde sur les fonctions de l'instrument. Cette dernière est plus puissante et assure plus de réussite que la première.

Nos remarques :

Vermersch nous dit que l'adulte face à un objet nouveau mobilise le registre empirique, le registre sensori-moteur. Or, l'adulte, face à une situation nouvelle, ne l'aborde pas sans ressources cognitives. Il ne régresse pas au niveau sensori-moteur.

L'adulte ne dispose pas uniquement de quatre instruments cognitifs. Il dispose d'une variété d'instruments. La grille de Vermersch ne lui permet pas de le constater parce qu'il a calqué les registres sur les stades et que ceux se réduisent à quatre. Ce qui l'empêche probablement de noter d'autres instruments possibles mis en jeu chez l'adulte. Par exemple, on peut supposer que dans le tâtonnement, il y a déjà des connaissances en jeu qui analysent les réactions de l'oscilloscope. Le fait de savoir qu'il faut associer deux boutons appartenant à

deux plans différents ne tombe pas du ciel. Par ailleurs, les registres de fonctionnement correspondent à une construction artificielle.

Ce que nous retenons de Vermersch c'est le concept de micro genèse. On note effectivement que le sujet construit une connaissance par étapes, dans une situation particulière et dans une activité particulière : le réglage d'un instrument. Le mérite de Vermersch est d'être le premier à étudier une microgenèse chez l'adulte en se démarquant « légèrement » de Piaget. Il a en quelque sorte initié les études micro génétiques chez l'adulte en formation. Seulement c'est une micro genèse d'une conduite, d'un modèle de l'activité et non celle d'un objet technique qui s'appuie sur une théorie. Les sujets observés par Vermersch ne cherchent pas à apprendre une théorie en électronique. Ils ne cherchent pas à comprendre le fonctionnement de l'objet et les processus électroniques en jeu dans ce fonctionnement. Ils cherchent à savoir comment le régler, parce qu'ils auront à l'utiliser dans leur futur métier.

4.3.2. Microgenèse de l'utilisation d'un instrument :

Rabardel (1993) a étudié l'apprentissage de l'utilisation d'un robot par des sujets pour agir à distance sur un objet en vue de le transformer. Dans cette situation, le robot constitue pour les sujets un objet nouveau. C'est une situation d'apprentissage par la découverte. Cette situation oblige à apprendre la manipulation de ce robot et à apprendre à l'utiliser pour transformer un autre objet. Le robot correspond à un dispositif composé de plusieurs éléments : un clavier d'ordinateur, un écran, un programme, un bras articulé doté d'une pince. Les sujets agissent sur le robot par l'intermédiaire du clavier qui transmet les instructions au bras articulé. Les instructions transmises sont interprétées par un programme informatique. La manipulation du clavier se traduit à l'écran sous forme d'un curseur qui se déplace. C'est l'ensemble : clavier, écran, programme et bras du robot, qui constitue l'objet technique servant d'intermédiaire pour agir sur l'objet à transformer.

Dans ce dispositif Rabardel distingue deux espaces : l'espace de commande (constitué par la position d'un curseur à l'écran que l'utilisateur manipule à l'aide du clavier) et l'espace de travail (constitué par la position de la pince du robot en réponse à la commande). Les deux espaces sont interfacés par le programme informatique. Dans cette activité, l'opérateur n'a pas besoin d'être un informaticien pour manipuler « l'organe de commande » ou de maîtriser des connaissances en électronique, en mécanique et en robotique. Son activité ne vise pas non plus l'apprentissage d'une théorie en informatique, en robotique ou en mécanique. Autrement dit, le sujet n'a pas besoin de comprendre le fonctionnement du système technique pour l'utiliser. L'activité d'apprentissage vise l'utilisation de ce dispositif de manière adaptée à un

but défini d'avance : obtenir la position désirée du bras du robot. C'est une activité productive, qui vise un but pragmatique : savoir utiliser l'instrument, et non comprendre son fonctionnement dans le détail et avec précision.

Dans une situation d'apprentissage par la découverte, Rabardel étudie l'impact de l'usage de cet objet technique (le robot), sur l'activité cognitive. Il met en évidence les étapes de la genèse représentative des utilisateurs. L'utilisation d'un objet technique comme instrument d'une manière adaptée n'est pas donnée. Elle relève d'une genèse au cours de laquelle l'artefact se transforme en instrument.

Rabardel analyse cette genèse en termes d'assimilation-accommodation.

Il note que dans la plupart des situations explorées, les sujets, au moins en phase initiale, tendent à attribuer aux objets sur lesquels ils agissent et aux instruments qui sont les moyens de l'action, des caractéristiques et propriétés propres au sujet lui-même. Autrement dit, les sujets mobilisent des connaissances déjà disponibles. Le processus d'assimilation est mis en jeu en premier. Les utilisateurs n'obtiennent pas le résultat souhaité dès le départ. Les représentations initiales de l'action ne sont pas adaptées. Ce qui correspond à une perturbation. Le processus d'accommodation est mis en jeu. Dans ce processus, les sujets doivent modifier leurs représentations initiales pour construire progressivement de nouvelles représentations qui conceptualisent la relation entre la position des curseurs dans l'espace de commande et la position de la pince dans l'espace de travail. Ils doivent coordonner deux éléments de l'objet technique : le curseur et la pince. Au départ, les sujets construisent les propriétés de l'artefact. Les déplacements de celui-ci sont conçus au départ comme le prolongement des actions du sujet. Cette première construction subit ensuite une transformation profonde. La représentation des déplacements de l'objet comme le prolongement des actions du sujet se transforme en une représentation de positions et de leur changement pourvu d'un repère définissant l'ensemble des emplacements possibles pour les objets, la pince et le robot lui-même.

En parallèle, la représentation des propriétés du dispositif de commande subit une évolution en une représentation qui coordonne le curseur, qui était pensée isolée, aux transformations dans l'espace de travail (action de la pince sur l'objet à transformer). Dans cette représentation, la position du curseur dans l'espace de travail définit les positions de la pince dans l'espace de travail. Autrement dit lorsqu'on voit à l'écran la position du curseur, on se représente la position de la pince.

La représentation du dispositif de commande du robot n'est constituée au moyen de l'action que dans la dernière phase de la micro genèse.

L'idée principale qui se dégage de l'étude de Rabardel est la suivante. Dans une genèse instrumentale, un objet technique a au début une existence sous forme d'artefact. Pour l'utiliser dans une activité productive, il le transforme, en se l'appropriant, en instrument pour lui-même. Au cours de cette appropriation de l'instrument, il construit un schème d'utilisation.

Pour Rabardel, un schème d'utilisation est constitué d'un schème et d'un artefact. Dans ce processus de construction du schème d'utilisation, il y a une double transformation. Une transformation évidente de l'artefact en instrument et une autre moins évidente, mais très importante, la transformation d'un schème.

Pour bien mettre en évidence cette double transformation, mettons nous dans la situation où le sujet est amené à changer d'outil de production. La transformation qui va porter sur l'artefact nouveau, va aussi porter sur le schème. Le schème précédent, un schème familier, représente ce qui est préconstruit, un acquis à la disposition du sujet pour un nouvel apprentissage. Les schèmes familiers ont des significations différentes et ont la capacité de changer de signification. Ce changement de signification est ce qui s'observe lorsqu'un sujet est confronté à un artefact nouveau. Les schèmes familiers jouent un rôle heuristique fondamental. Cette possibilité est un facteur d'évolution de la représentation du problème en fonction des tentatives de solutions et de leurs résultats.

Le changement d'outil correspond à un moment de mutation, de genèse instrumentale, où le schème renvoie à une organisation souple capable de s'adapter à la nouveauté. La transformation de l'artefact en instrument correspond à la genèse de la dimension opérative et la transformation du schème correspond à la genèse de la dimension épistémique.

Ainsi, dans cette genèse, le sujet mobilise au départ des connaissances disponibles, un schème familier. Ces connaissances se révèlent inopérantes. Dans un processus d'accommodation, la régulation de l'action est orientée vers l'objet, régulation qui aboutit à une coordination agie. Cette coordination agie se double d'une coordination en pensée, au cours de laquelle le schème familier est transformé.

L'instrument construit est une entité mixte, bifaciale, dont une face est tournée vers le pôle objet et l'autre vers le pôle sujet. La position intermédiaire de l'instrument en fait un médiateur des relations entre le sujet et l'objet.

La médiation dans le sens de l'objet vers le sujet, où l'instrument est un moyen qui permet la connaissance de l'objet, Rabardel la qualifie de médiation épistémique.

La médiation dans le sens du sujet vers l'objet, où l'instrument est moyen d'une action transformatrice (en un sens large incluant le contrôle et la régulation) dirigé vers l'objet, est une médiation pragmatique.

Dans une activité réelle, ces deux dimensions ne sont pas distinctes, elles sont constamment en interaction.

C'est à partir de cette double dimension de l'instrument : pragmatique et épistémique, construite dans l'action, que Rabardel, avec Samurçay, énonce le principe devenu célèbre : une activité productive est une activité constructive, et son inverse (Samurçay et Rabardel, 2004).

L'étude de Vermersch et de Rabardel relève d'une microgenèse de l'objet technique. Dans ces deux études, l'objet technique est transformé par l'action du sujet. Dans les deux, l'objet réagit aux actions du sujet. Mais, pour Rabardel, il y a toujours une connaissance au départ, un schème familier, qui s'adapte à l'objet pour donner naissance à un schème d'utilisation nouveau.

4.3.3. Microgenèse du dépannage d'une motrice de rames de Métropolitain :

Bertrand et Weill-Fassina (1995) ont étudié l'activité de dépannage de motrices de rame du métropolitain chez trois opérateurs expérimentés. Dans le dépannage, il y a deux phases : la phase de diagnostic et la phase d'intervention sur le dispositif pour réparer la panne. Dans le diagnostic, il n'y a pas d'intervention sur le dispositif pour le transformer. Leur étude se limite au diagnostic de panne. Elle vise l'explication du processus de diagnostic sur deux plans : micro génétique et macro génétique. Le plan micro génétique se limite au processus mis en œuvre dans la situation présente considérée comme une situation particulière. Il se rapporte à l'activité située, qui se déroule sur une courte période : la durée de réalisation de la tâche de dépannage, liée à une situation particulière. Le plan macro génétique vise l'explication du processus à l'échelle de l'expérience professionnelle, qui s'inscrit dans le long terme. Elle est liée à une classe de situations.

Ces auteurs cherchent d'abord à clarifier la microgenèse en analysant les représentations du sujet au cours de son activité.

Ensuite ils cherchent à comprendre comment la macrogenèse intervient dans la microgenèse et comment celle-ci contribue à l'enrichissement de la première.

Microgenèse et macro genèse sont analysées en référence à la théorie de l'équilibration de Piaget.

Ils partent de l'hypothèse que le processus de représentation joue un rôle important dans cette activité et en constitue le cadre organisateur. Il permet de comprendre les mécanismes cognitifs sous jacents. Ils ne cherchent pas à dégager un modèle cognitif unique, mais à dégager les structures caractéristiques de conduites différentes.

La situation de diagnostic de panne est une situation de construction du problème et non de résolution de problème. Dans cette situation, l'opérateur ne dispose que très rarement, de façon explicite, des données du problème. La solution n'est pas connue d'avance. Elle est le résultat d'un processus de recherche dont l'aboutissement est la définition du problème. Dans ce processus, l'opérateur construit, lors de la micro genèse, des représentations qui sont le résultat d'une interaction entre une représentation en mémoire et une information recueillie sur le système.

La construction du problème se fait par étapes au cours desquelles les représentations sont transformées. Toute l'activité de diagnostic consiste à acquérir des informations sur le dispositif et à transformer sa représentation de son état. La recherche d'informations revêt une grande importance dans le diagnostic. Elle n'est pas évidente car, sur un train, les informations ne sont pas toutes disponibles et leurs sources sont très dispersées. Cette recherche relève d'un savoir-faire.

Le processus commence par une interaction d'une connaissance disponible en mémoire avec les données de la situation de travail. La représentation mobilisée à l'étape initiale est une représentation issue de l'expérience antérieure. Cette représentation est sollicitée par un symptôme. C'est sur la base de cette représentation initiale que le sujet interroge le système. Une information recueillie sur le dispositif transforme la représentation initiale en une représentation événementielle. Celle-ci constitue une hypothèse. Cette représentation est une construction d'une « représentation sens ». Elle est élaborée en fonction des connaissances du sujet et du but poursuivi : l'identification de la cause de la panne. L'hypothèse est guidée par le but. La représentation construite correspond à une représentation fonctionnelle (Leplat, 1985, Vergnaud, 1986) ou représentation opérative (Ochanine, 1978, Pastré, 2005).

Dans une perspective micro génétique, il y a un double processus d'assimilation et d'accommodation des propriétés de la situation qui se poursuit jusqu'à parvenir à un état stable (de la représentation construite) : la spécification de la panne.

Dans cette perspective, c'est l'accommodation qui prend le pas sur l'assimilation. Lors de la première interaction avec le dispositif, il y a essai d'assimilation, mais comme la connaissance en mémoire n'est pas adaptée à la situation qui est nouvelle pour le sujet, le processus d'accommodation est mis en jeu.

Ce qui suppose deux cas :

- La situation nouvelle ne pose pas de problème. Elle est différente, mais elle est assimilable à la classe de situation construite. C'est la situation qui s'adapte à la connaissance disponible. Il n'y a pas de changement au niveau de la représentation ;

- La situation nouvelle pose un problème. Dans ce cas, la connaissance disponible s'efforce de s'adapter à la situation, ce qui définit le processus d'accommodation. C'est la connaissance qui va changer. Elle va se transformer par une série d'élaborations lors de l'activité de diagnostic. Ce qui relève d'une micro genèse. À l'issue de cette activité, le sujet aura, s'il y a réussite, acquis l'expérience d'une situation singulière.

Ce qu'il faut retenir de cette recherche :

L'activité de diagnostic d'une panne est une activité de compréhension et non une activité de transformation du système ou de son utilisation ou de sa conduite en vue de produire un objet matériel ou symbolique. Cette compréhension se situe à un plan micro génétique. Dans cette micro genèse, la réussite correspond à la définition du problème et à l'identification de la cause de la panne. Elle résulte d'une série de transformations de représentations intermédiaires, dites événementielles, qui sont des représentations fonctionnelles. Il y a au départ une représentation héritée du passé qui est mobilisée. C'est cette représentation existante à l'état initial qui sera transformée au cours de l'activité. Cette transformation résulte de l'interaction avec les données acquises au cours de l'activité. Chaque représentation intermédiaire construite est le fait d'opérations déterminées par les connaissances du sujet. À la fin de l'activité, lors d'une réussite, il y a construction d'une structure cognitive stable qui explique la panne.

L'expérience de cette situation singulière enrichit l'expérience antérieure. Autrement dit, une microgenèse enrichit la macrogenèse par équilibration majorante.

4.3.4. Microgenèse du dépannage de cartes électroniques :

Camusso (2002) a analysé l'activité de dépannage de cartes électroniques de tuner TV chez six techniciens en utilisant le cadre théorique de Pastré. Son étude vise à identifier les concepts pragmatiques mobilisés par ces techniciens, la structure conceptuelle de situation, les stratégies, et le rapport entre ces derniers et la formation initiale, d'une part, et l'expérience professionnelle, d'autre part. Dans son analyse, il a comparé la conduite de débutants dans ce métier à celle de sujets expérimentés.

Son analyse lui a permis de noter l'existence de deux concepts pragmatiques : le concept de bloc et le concept d'écroulement, et de deux stratégies : une stratégie topographique et une stratégie fonctionnelle.

Pour établir la relation de signification qui existe entre le principe organisateur du concept et les indicateurs qui sont mobilisés par les acteurs pour son usage, il distingue deux types d'indicateurs : des indicateurs d'attributs et des indicateurs d'état.

Les indicateurs d'attributs sont les caractéristiques que chaque personne attribue au concept et qu'elle peut vérifier pour savoir si elle a bien défini un bloc.

Les indicateurs d'état correspondent à des informations complémentaires aux informations d'attributs qui conditionnent l'engagement d'une action.

Ces deux types d'indicateurs ne résument pas l'ensemble des informations qui pourraient être prises pour décrire un concept. Il en existe d'autres qui ne sont pas pertinentes pour l'action. Dans une conceptualisation, il s'agit bien d'extraire uniquement les données utiles.

Le concept de bloc :

Un bloc est un regroupement sur le schéma de composants permettant des prises de mesures en amont et en aval de ce regroupement et permettant d'isoler une zone d'investigation.

Un bloc peut être en état d'équilibre ou de déséquilibre. L'action est engagée en fonction de ces états. En cas d'équilibre, le sujet poursuit sa recherche au niveau d'un autre bloc. En cas de déséquilibre, il continue son investigation.

L'utilisation de la notion de bloc révèle un réel travail de conceptualisation car ainsi l'unité élémentaire d'analyse n'est pas l'unité physique que constitue le composant. Il y a donc nécessité, pour chaque personne, avant d'entrer dans l'action, d'engager un travail conceptuel d'arrangement de composants pour constituer des blocs.

Le concept d'écroulement :

L'écroulement d'un signal est un phénomène physique qui fait que le déséquilibre d'un bloc tient à un défaut de fonctionnement d'un composant situé en aval de ce bloc. La prise en compte de la possibilité d'écroulement est une dimension discriminante de la conduite du diagnostic d'un circuit. Deux personnes seulement la prenaient explicitement en compte. En fait l'écroulement correspond à un état de fonctionnement du signal. On pourrait même dire par extension qu'il s'agit d'un état d'un bloc. Cependant rien ne manifeste l'écroulement. Il doit être déduit de la combinaison d'autres informations.

L'action qui permet de statuer sur l'état écroulé ou non du signal est un contrôle du signal en sortie du bloc une fois le bloc isolé de l'aval du circuit. C'est la raison pour laquelle un des attributs du concept de bloc est sa capacité à être isolable.

On peut ainsi introduire un nouvel état du bloc pour guider l'action qui sera « isolé » ou « branché ».

Ainsi la prise en compte de l'équilibre du bloc doit maintenant être conjuguée avec l'état isolé ou branché du bloc.

La notion d'état du bloc guide la conduite de l'action. Le concept de bloc est lié ainsi aux règles d'action suivantes, identifiées par Camusso :

R1 : Si [bloc déséquilibré] alors [conduire l'investigation] sinon [passer au bloc suivant]

R2 : Si [bloc branché déséquilibré] et [bloc isolé déséquilibré] alors [conduire l'investigation dans le bloc]

R3 : Si [bloc branché déséquilibré] et [bloc isolé équilibré] donc [signal écroulé par un composant en aval dit bloc] alors [conduire l'investigation dans un bloc aval]

Les stratégies :

La stratégie topographique consiste à suivre le signal pas à pas le long du circuit. Elle a une faible portée dans le diagnostic.

La stratégie fonctionnelle met en œuvre un raisonnement fonctionnel et procède par évaluation du dysfonctionnement. Elle se fonde sur une représentation du système. Autrement dit, le sujet reconçoit le système. Dans cette stratégie, le concept de bloc et le concept d'écroulement sont liés et sont mobilisés ensemble. Elle permet au sujet de circonscrire le bloc du circuit où il y a la panne. Ce bloc est identifié à partir du lieu où le signal s'écroule. La mobilisation de ces deux concepts dans une stratégie témoigne de l'existence d'une structure conceptuelle de situation.

Camusso a analysé le rapport entre la mobilisation de ces concepts et la première rencontre professionnelle avec le domaine de l'électronique, d'une part, et l'expérience professionnelle, d'autre part.

Il a noté une corrélation entre l'élaboration du concept pragmatique et la rencontre avec la profession dans une position d'action sur le système. C'est-à-dire que si on n'a eu qu'une formation théorique sans exercice d'une activité, cela a très peu d'impact sur l'activité professionnelle.

Ensuite il a analysé le rapport de l'expérience professionnelle antérieure dans le domaine avec le développement d'un concept. Il a constaté que l'expérience professionnelle a un effet notable. La nature du concept élaboré varie selon que l'on a exercé une activité de concepteur de système, de réalisateur de système ou simplement d'utilisateur. En effet, un concepteur et un réalisateur manipulent le système de l'intérieur. Ils disposent d'une représentation de son fonctionnement interne. Par contre un utilisateur ne s'intéresse pas au

fonctionnement du système. Ce qu'il attend d'un système c'est le service rendu. L'expérience professionnelle conditionne le développement du concept d'écroulement.

Il note enfin que deux experts ayant la même expérience et la même formation ont deux stratégies différentes. Cette variation dépend de l'activité dans laquelle on a constitué une expérience : concepteur, réalisateur ou utilisateur.

Les experts prennent en compte la structure profonde de la situation alors que les novices se laissent guider par les traits de surface les plus visibles.

Les experts mobilisent une représentation opérative (MO ou ME) dans laquelle les traits pertinents de l'action ont été sélectionnés, alors que les novices utilisent une représentation « cognitive » (MC), théorique ou générale de la situation.

Du point de vue des modalités de régulation de l'action, Camusso note que l'anticipation des effets possibles de l'action est plus grande chez les experts que chez les novices.

Les novices utilisent une planification basée sur un strict suivi des règles prescrites alors que les experts cherchent plutôt à exploiter des opportunités.

La structure conceptuelle de la situation :

Les deux concepts de bloc et d'écroulement constituent la structure conceptuelle de la situation de diagnostic au sein de laquelle ils sont interdépendants. Le concept de bloc, unité de base de l'analyse pour être mobilisé complètement dans l'action, nécessite de pouvoir prendre en compte l'état écroulé ou non, du signal qui le traverse et donc de mobiliser le concept d'écroulement. Réciproquement, l'écroulement du signal ne pourra se manifester qu'au travers de l'utilisation du concept de bloc pour segmenter la prise de mesure sur le signal.

La prise en compte du concept d'écroulement nécessite l'intégration de la dimension systémique de la situation. En effet, les blocs ne sont pas uniquement juxtaposés, mais ils sont liés entre eux par le fait qu'un signal mesuré dans un bloc peut être influencé par un composant situé dans un autre bloc en aval. L'organisation des blocs le long du signal permet de limiter les interactions possibles entre blocs et donc de faciliter l'investigation en réduisant les configurations possibles.

Cette étude met en évidence l'importance du modèle épistémique dans l'activité de dépannage. Les connaissances sur le fonctionnement du système sont déterminantes, mais non suffisantes pour la réussite de l'action dans cette activité. L'exercice de cette activité est nécessaire. Cette étude du dépannage montre l'équivalence relative entre les deux modèles du

sujet : le modèle opératif et le modèle épistémique. On ne peut pas dépanner avec efficacité des cartes électroniques sans avoir des connaissances sur le fonctionnement du système.

4.3.5. Microgenèse de la conception d'un objet technique :

En psychologie, le terme de conception est devenu très ambigu. Du point de vue de l'activité, il désigne à la fois les processus cognitifs mis en jeu chez l'utilisateur et chez l'inventeur d'un objet. Or concevoir un objet pour l'utiliser et le concevoir, au sens de l'inventer, ne relève pas du même processus cognitif. Dans les quatre études présentées précédemment, il s'agit de la conception d'un objet existant pour l'utiliser, le dépanner ou le maintenir. Par contre, ici, il s'agit de la conception d'un objet qui n'a pas encore d'existence concrète, il ne peut avoir qu'une existence mentale.

L'activité de conception, au sens d'invention, intéresse quasiment tous les domaines (industrie, architecture, informatique, recherche, etc.). De Vries, Baillé et Géronimi (2005) ont identifié trois traits communs à l'activité de concepteur de différents domaines : l'activité de conception est créative, les objets conçus sont fonctionnels, la production de représentations externes est nécessaire. La conception dont il est question ici concerne l'objet technique, l'artefact, qui relève du domaine industriel, activité généralement dévolue à l'ingénieur.

Dans les sciences de l'ingénieur, on désigne par « processus de conception » l'ensemble des activités anticipant la fabrication d'un produit. Ces activités débouchent non seulement sur la définition du produit, mais aussi sur la mise au point de l'ensemble du processus industriel nécessaire pour la production et la vérification des performances du produit. Dans cet ensemble, c'est la part qui incombe au sujet qui élabore une représentation ou un modèle de l'objet à réaliser qui nous intéresse. Dans cette activité de conception, on ne connaît pas beaucoup de choses sur le processus cognitif mis en jeu par le concepteur dans la conception, au sens d'invention, d'un objet technique nouveau. L'étude des processus cognitifs mis en jeu dans la conception, au sens d'invention, d'un objet technique présente des problèmes d'ordre méthodologique. En effet, il est difficile de suivre cette activité du concepteur qui est en majorité intériorisée.

Dans la conception chez l'utilisateur ou le dépanneur, l'objet existe et sert d'appui à la fois au sujet pour en construire une représentation et à l'observateur pour comprendre le processus d'élaboration de cette représentation. Nous rangeons dans cette catégorie « la

conception continuée dans l'usage » étudiée par Pascal Béguin, parce que le concepteur dispose d'un objet concret et d'informations sur son utilisation.

Dans une conception, au sens d'invention, l'objet au départ est mental et n'a pas d'existence concrète. On n'a accès qu'aux résultats de cette activité et non au processus cognitif mis en jeu pour les produire. Tout le processus qui aboutit à ces productions demeure inaccessible à la fois au concepteur lui-même et à l'observateur. Lorsqu'on demande au concepteur de rendre compte de cette phase dans la conception, il a tendance à rationaliser son processus cognitif. Ce qui se comprend en partie car les instruments cognitifs mobilisés lors de cette phase constituent des « outils » de la pensée, ce par quoi il pense. Pour en rendre compte il faut qu'il dispose de la capacité de penser ce qu'il pense au moment où il le pense, d'une part, et de la capacité à les verbaliser, d'autre part. Or on sait que cette capacité métacognitive est difficile à réaliser au cours de l'activité. Par ailleurs, cette activité métacognitive dérange le processus de conception en cours.

Cependant, quelques recherches²⁸ ont pu mettre en évidence quelques résultats intéressants par rapport aux processus cognitifs mis en jeu dans la conception. Nous avons relevé deux observations intéressantes :

Première observation :

Un concepteur ne suit jamais les méthodes rationnelles et analytiques de conception, qui lui dictent qu'il faut d'abord faire une analyse du problème, et après concevoir une solution. L'activité de conception a un caractère opportuniste.

Ces méthodes prescrites préconisent un modèle de conception où les changements de représentation s'opèrent de façon linéaire et séquentielle.

À partir du cahier des charges, le concepteur doit d'abord élaborer des spécifications fonctionnelles qui correspondent à la solution. 1/ Ensuite il doit élaborer des spécifications structurelles qui correspondent à la solution. 2/ Enfin il doit élaborer des spécifications physiques qui correspondent à la solution. 3/ Les spécifications physiques peuvent être décomposées en "n" solutions. C'est ce qui correspond au raffinement des solutions. C'est un modèle dans lequel la construction du problème se développe au travers des solutions successives : modèle dit « transformationnel » des données.

28 - Cf. 1/ Darses F., Détienne F. et Visser W., (2004), *Les activités de conception et leur assistance*, in Falzon P., *Ergonomie*, Paris, Puf, p. 545-563. 2/ Béguin P. et Darses F., *Les concepteurs au travail et la conception des systèmes de travail : Points de vue et débats*, Acte du colloque « Recherche et ergonomie », Toulouse, février 1998.

Le modèle « transformationnel » : les spécifications fonctionnelles (étude de besoin, de faisabilité et étude fonctionnelle) doivent être déclinées en spécifications structurelles ensuite en spécifications physiques de l'objet.

Par exemple, dans la conception d'une voiture, on commencera par les spécifications des propriétés fonctionnelles du nouveau véhicule, qui précisera, éventuellement, qu'il sera une voiture urbaine (volume de l'habitacle, puissance du moteur, etc.), suivies de spécifications physiques et concrètes du produit, où l'on précisera que le moteur sera de tel ou tel matériau, composé de telle et telle pièces, etc. Chaque niveau d'abstraction produit une solution à part entière. C'est un modèle en cascade.

Dans le processus effectif de conception, les concepteurs élaborent simultanément toutes les spécifications à la solution 1. Ils progressent dans la conception selon cette même « procédure » jusqu'à la fin. Selon Darses et al. (2004) « l'organisation séquentielle de la conception se heurte à la démarche effective des concepteurs et aux processus cognitifs que ceux-ci mettent en œuvre pour résoudre les problèmes de conception ».

Deuxième observation :

Un concepteur aborde généralement la situation présente avec une situation développée dans le passé. Il pense solution du problème dès le début. C'est ce que Béguin et Darses appellent « prégnance de la solution dans le processus mental ». Les concepteurs ne pensent pas à analyser le problème d'abord et à concevoir la solution après. Ils cherchent à trouver une solution avant même d'avoir analysé le problème dans le détail. Et c'est cette solution conçue par analogie qu'ils font évoluer. La gestion des contraintes reste liée au modèle analogique mobilisé.

Discussion :

Dans ces différentes études empiriques, on peut noter qu'à part l'étude de Vermersch, toutes les autres microgenèses se font à partir d'une connaissance existante : schème familial chez Rabardel, représentation issue de l'expérience antérieure chez Bertrand et Weill-Fassina, expérience professionnelle ou connaissance issue d'une formation chez Camusso, solution empruntée à une situation précédente, chez Béguin et Darses. Le sujet aborde la situation nouvelle avec une connaissance préexistante. C'est cette connaissance qui est l'objet de transformation ultérieure pour s'adapter à la situation nouvelle. L'adaptation dépend de la

pertinence de cette connaissance par rapport à cette nouvelle situation et de la capacité du sujet à la transformer.

La genèse d'une nouvelle conduite s'effectue par étapes où l'on note les deux mouvements évoqués par Pastré (2005) : de l'extérieur vers l'intérieur et du passé vers le présent. Cette genèse ne s'effectue pas d'une manière uniforme dans tous les cas.

Si l'on se situe du point de vue de l'action, on peut distinguer trois types d'activités : utiliser ou conduire un objet ; le dépanner ou le maintenir et le concevoir au sens de l'inventer.

Dans ces trois types d'activités, la transformation du modèle du sujet varie. Selon le type d'activité, la transformation portera plus sur le modèle épistémique ou sur le modèle opératif. Dans l'exemple de Vermersch et Rabardel, l'utilisation de l'objet n'a pas besoin d'un modèle épistémique élaboré. Autrement dit la part épistémique du modèle du sujet est moindre car le sujet n'a pas besoin de connaître le fonctionnement de l'objet dans ses moindres détails pour l'utiliser ou le conduire. Mais cela dépend des objets techniques que l'on va utiliser. Certains nécessitent une connaissance significative préalable de leur fonctionnement pour les utiliser, d'autres pas. La conduite d'une centrale nucléaire ou le pilotage d'un avion nécessitent un minimum de connaissance du système. Cependant, la conduite d'une voiture ou l'utilisation d'un ordinateur peuvent se passer d'une connaissance du fonctionnement du système. Dans la conduite ou l'utilisation d'un système, c'est toujours la part opératoire qui domine dans le modèle du sujet. Il y a une part épistémique, mais qui est moindre.

Par contre, il faut disposer d'une connaissance suffisante, plus consistante, pour pouvoir le dépanner ou le maintenir efficacement. Nous avons vu avec Camusso que cette connaissance est déterminante dans les stratégies mobilisées. Les stratégies les plus efficaces sont celles qui s'appuient sur une connaissance plus élaborée du fonctionnement du système. Mais la seule connaissance du fonctionnement du système n'est pas suffisante, il faut disposer d'un savoir-faire. Le modèle opératif et le modèle épistémique dans ce type d'activité ont une importance quasi équivalente.

L'importance du modèle épistémique de l'objet varie donc selon que l'on souhaite utiliser un instrument technique, le dépanner ou le concevoir.

Ainsi, dans ces trois types d'activités, l'importance de chacune de ces dimensions du modèle varie :

	Utiliser ou conduire	Dépanner ou maintenir	Inventer ou concevoir
MO	Plus	Équivalent	Moins
ME	Moins		Plus

Quant à la conception d'un objet, au sens d'invention, c'est le modèle épistémique qui est dominant. Il y a une part opérative, mais qui est moindre. Ce qui nous permet, en termes de modèle, de désigner la conception d'un objet, au sens de l'inventer, de processus de construction d'un modèle épistémique. La genèse de l'objet technique serait donc le fait d'une genèse d'un modèle épistémique de l'objet.

Une autre distinction est à souligner par rapport à ces trois types d'activités : la réponse de la situation à l'action.

Activité	Utiliser ou conduire	Dépanner ou maintenir	Inventer ou concevoir
Réaction			
Réaction de l'objet à l'action	Transformation	Pas de transformation dans le diagnostic	L'objet réel n'existe pas => pas de transformation
Réaction du sujet	Transformation de soi	Transformation de soi	Transformation de soi
Réaction de la situation	Oui	Oui	Oui mais d'une autre manière

Dans le premier type (utiliser ou conduire), la réaction de la situation s'exprime à travers la transformation de l'objet qui permet au sujet de réguler son action. Les réactions de l'objet constituent une source d'informations importante pour adapter son action. Dans le second type (dépanner ou maintenir), il n'y a pas de transformation de l'objet, mais celui-ci est disponible et constitue également une source d'informations pour le sujet pour confirmer ou infirmer les hypothèses élaborées. Par contre, dans le troisième type (inventer ou concevoir), l'objet n'existe pas encore. Si l'on se place du point de vue de l'objet et de sa

transformation ou non, on peut dire que la situation répond à l'action dans le premier et le second type d'activité et qu'elle n'y répond pas dans le troisième type. Cependant, dans ce troisième type, la réponse de la situation se fait selon un autre mode.

Nous avons précisé plus haut qu'il y a toujours une connaissance qui est mobilisée au départ dans la genèse d'un modèle. Dans ce troisième type, cette connaissance est mise en jeu dans l'élaboration d'une hypothèse de l'objet. Une fois mise en jeu, elle est tour à tour outil de la pensée et objet de la pensée. Comme outil de la pensée, cette connaissance c'est ce par quoi le sujet agit sur la situation pour la traiter et la penser. Dans cette opération, la connaissance interprète la situation. Une rupture s'opère et le sujet transforme cette connaissance en objet de pensée. Il y a un retour de la pensée sur la connaissance pour vérifier sa pertinence par rapport à la situation. Il y a un moment d'attente. Le sujet entre dans une phase de langage intérieur au cours duquel la connaissance est évaluée par rapport à la nouvelle situation. Il est quasiment impossible qu'une connaissance héritée du passé soit totalement adaptée à la situation présente, dans une activité de conception d'un objet nouveau, sinon, il n'y a rien à concevoir. Par contre, il arrive fréquemment que la connaissance mobilisée soit partiellement ou totalement inadaptée. Dans ce cas, il y a une contradiction entre la connaissance mobilisée et son résultat. Cette contradiction est la réaction de la situation. Généralement, la contradiction n'apparaît pas tout de suite. Il y a un temps entre le moment où elle est mobilisée et le moment où le sujet prend conscience qu'elle n'est pas adaptée. Ce temps peut être plus ou moins long. C'est à ce moment que commence la genèse.

On peut donc résumer ce processus comme suit : une mobilisation d'une connaissance préexistante, suivi d'une attente, suivie d'une réponse de la situation qui se manifeste par des contradictions qui initient la genèse. Nous rappelons que l'activité de conception est une activité à dimension essentiellement épistémique. Elle porte sur les connaissances du sujet et sur leur transformation. La contradiction qui surgit au cours de ce processus n'est pas facile à résoudre. On peut l'analyser en termes d'obstacles.

Mais avant de passer au chapitre de l'obstacle, signalons que

La genèse d'un modèle épistémique varie, d'un individu à l'autre, selon la nature de l'objet technique, les connaissances mises en jeu et leur niveau d'abstraction.

5. L'APP implique l'obstacle épistémologique :

Dans une genèse conceptuelle, le rétablissement de l'équilibre rompu lors de la confrontation à une situation totalement nouvelle pour le sujet, ne se réalise pas toujours sans problèmes, ni sans difficulté. Cette situation nouvelle résiste à la connaissance préexistante mobilisée. En fait, si l'on considère ce problème dans l'autre sens, c'est la connaissance qui résiste à ce changement. Elle a des difficultés à s'adapter à la nouvelle situation. On parle à ce moment d'obstacle épistémologique.

5.1. L'obstacle épistémologique chez Bachelard :

Bachelard a introduit la notion d'obstacle épistémologique suite à son analyse des erreurs commises par les scientifiques à travers l'histoire. Il a constaté que ces erreurs sont le fait d'obstacles de nature épistémologique. Ce sont des obstacles à la connaissance scientifique qui sont internes au sujet et non extérieurs. Ils se manifestent « dans l'acte même de connaître ». C'est dans cet acte, dit Bachelard, « qu'apparaissent, par une sorte de nécessité fonctionnelle, des lenteurs et des troubles. C'est là que nous montrerons des causes de stagnation et même de régression, c'est là que nous décèlerons des causes d'inertie que nous appellerons obstacles épistémologiques. »²⁹. (Bachelard, 1993)

Pour Bachelard, un obstacle épistémologique est une conception erronée. Il a identifié, à partir d'exemples historiques, quelques grandes catégories d'obstacles : l'expérience première ; l'utilisation abusive des images familières ; les connaissances générales ; l'obstacle verbal ; la connaissance unitaire et pragmatique ; l'obstacle substantialiste ; l'obstacle réaliste ; l'obstacle animiste ; l'usage d'analogies et de métaphores ; l'obstacle de la connaissance quantitative. Il ne prétend pas que ces obstacles constituent la totalité de ce que l'on peut rencontrer.

Dans l'étude de l'évolution de la science, il note que la pensée scientifique n'a pas émergé brutalement dans l'histoire. Elle a progressé par étapes, et par rectifications successives. Bachelard résume cette progression par la succession de trois formes de pensées qu'il appelle des « âmes » caractérisés par des intérêts :

Âme puérile ou mondaine, est celle de l'homme animé par une curiosité naïve, qui s'étonne des phénomènes naturels et qui s'amuse à faire de la physique naïve.

29 - Bachelard G. (1993), p. 13

Âme professorale, est celle de l'homme qui s'arrête à sa première abstraction et qui est fier de la reproduire sans cesse, avec autorité, en multipliant des démonstrations pour l'imposer aux autres, sans jamais la remettre en cause.

Enfin, *l'âme en mal d'abstraire et de quintessencier*, celle du scientifique consciencieux qui ne se contente jamais de ce qu'il a produit, qui le remet sans cesse en doute, qui ne s'arrête pas à sa première abstraction et s'impose l'abstraction comme un devoir.

L'âme puérile se caractérise par la naïveté, l'âme professorale par le dogmatisme et la suffisance et l'âme en mal d'abstraire par la volonté de percer les mystères du monde, de connaître en établissant une vérité dépourvue des intérêts des deux âmes précédentes.

Dans *La formation de l'esprit scientifique*³⁰, Bachelard a analysé les caractéristiques du raisonnement scientifique, et les obstacles mentaux qui empêchent sa manifestation. Il établit une distinction nette entre le sens commun et la pensée scientifique. Il estime que la pensée rationnelle et scientifique n'est pas un processus spontané de l'être humain. Cela ne peut se faire qu'après avoir surmonté un certain nombre d'obstacles épistémologiques ; après avoir remis en cause de fausses évidences, des raisonnements erronés, etc. C'est la thèse centrale soutenue dans cet ouvrage.

Le développement de la science comme Bachelard le conçoit apparaît, à l'échelle de l'histoire des sciences, comme une genèse analogue à la phylogenèse (développement de l'espèce). Cette genèse de la pensée scientifique est transposée à l'échelle individuelle, au développement de la connaissance scientifique chez l'individu (l'ontogenèse). Bachelard émet l'hypothèse que l'individu reproduit les mêmes erreurs que les scientifiques ont commises à travers l'histoire. Ce sont des erreurs qui sont le fait de représentations qui ont plusieurs origines et prennent différentes formes. « Même chez l'homme nouveau, il reste des vestiges du vieil homme. » (Bachelard, 1993)³¹

Ce phénomène de l'obstacle épistémologique peut s'observer aussi chez l'homme actuel.

Les représentations dont dispose un individu peuvent constituer des obstacles épistémologiques à l'accès aux connaissances scientifiques. Pour surmonter ces obstacles, Bachelard préconise une méthode, « la méthode critique », permettant de partir de ces représentations et d'avancer par rectifications successives jusqu'à la construction du concept scientifique. L'obstacle épistémologique se manifeste sous forme d'erreur.

³⁰ - Première édition chez Vrin en 1938

³¹ - Bachelard (1993), p. 7

N'importe qui est exposé aux erreurs. Bachelard donne à l'erreur un statut positif. Elle a une utilité dans le développement de l'esprit scientifique. L'erreur est au cœur de l'esprit scientifique : « L'esprit scientifique se constitue sur un ensemble d'erreurs rectifiées. » L'erreur est aussi au cœur de la méthode scientifique : celle-ci consiste plus à dépister des erreurs qu'à trouver des vérités. La science est une lutte permanente contre l'erreur, l'image trompeuse. Elle ne progresse qu'en s'opposant et n'évolue jamais sur une terre ferme et assurée.

Pour la formation d'un esprit scientifique, Bachelard propose une philosophie du non. Celle-ci n'est pas une volonté de négation (Bachelard, 1993)³². « Elle ne procède pas d'un esprit de contradiction qui contredit sans preuve. » (Bachelard, 1993)³³. « La négation doit rester en contact avec la formation première. » (Bachelard, 1993)³⁴. Elle doit permettre une généralisation dialectique. « La généralisation par le non doit inclure ce qu'elle nie. » (Bachelard, 1993)³⁵. Bachelard note que, dans l'histoire des sciences, « la géométrie non-euclidienne enveloppe la géométrie euclidienne ; la mécanique non newtonienne enveloppe la mécanique newtonienne ; la mécanique ondulatoire enveloppe la mécanique relativiste. »³⁶ Tout l'essor de la pensée scientifique depuis un siècle provient de telles généralisations dialectiques avec enveloppement de ce que l'on nie. De la même manière qu'une théorie récente intègre une théorie ancienne, une connaissance scientifique doit se constituer en intégrant une connaissance erronée qui la contredit. « La *philosophie du non* se trouvera donc être non pas une attitude de refus, mais une attitude de conciliation. »

Pour Bachelard, le « non » signifie dépasser et compléter le savoir antérieur, la connaissance scientifique doit englober les contradictions.

La pensée scientifique doit rompre radicalement avec nos modes habituels de pensée et d'expression, mais en les intégrant dans de nouvelles pensées qui ne les nient pas. C'est de cette manière que Bachelard conçoit l'acte mental permettant de surmonter l'obstacle.

La connaissance qui est considérée comme une erreur n'est pas à exclure ou à nier. Il faut s'en servir pour construire une connaissance nouvelle qui la dépasse en la surmontant. C'est l'acte de surmonter qui est difficile à réaliser.

Les obstacles épistémologiques sont à la fois le produit de l'activité cognitive spontanée, et des modes de fonctionnement qui la conditionne. La constitution de ces

32 - ibid., p. 135

33 - ibidem, p. 135

34 - ibidem, p. 137

35 - ibidem, p. 137

36 - ibidem, p.137

obstacles est le fait du fonctionnement naturel de l'esprit. Celui-ci a tendance à produire un « sens commun » par nécessité fonctionnelle. Ce sont des erreurs d'un point de vue scientifique.

Dans sa formation individuelle, un esprit scientifique passerait donc nécessairement par les trois états suivants, beaucoup plus précis et particuliers que les formes comtiennes (Auguste Comte).

1 *L'état concret* où l'esprit s'amuse des premières images du phénomène, et se satisfait de la perception immédiate du réel ou de l'explication des phénomènes que fournit la littérature philosophique. L'individu est animé par une curiosité naïve, jouant à la physique pour se distraire et se divertissant de tout phénomène expérimental sortant de l'ordinaire. L'intuition naturelle n'est qu'une intuition particulière. Elle ne permet pas de fonder une connaissance scientifique. Cet état concret correspond à l'âme puérile.

2 *L'état concret-abstrait* où l'esprit effectue un mélange paradoxal d'abstraction et d'intuition en associant à l'expérience physique des schémas géométriques et s'appuie sur une philosophie de la simplicité. L'esprit est encore dans une situation paradoxale : il est d'autant plus sûr de son abstraction que cette abstraction est plus clairement représentée par une intuition sensible. L'individu campe souvent dans un dogmatisme déductif, interprétant systématiquement le réel au travers de grandes théories explicatives posées a priori. Cet état correspond à l'âme professorale.

3 *L'état abstrait* où l'esprit se détache réellement de la perception et de l'intuition immédiates. Il s'agit d'une « conscience scientifique douloureuse », toujours prête à remettre en question l'acquis du moment en rectifiant les erreurs passées. « Dans l'œuvre de la science seulement, affirme G. Bachelard, on peut aimer ce qu'on détruit, on peut continuer le passé en le niant, on peut vénérer son maître en le contredisant. » Il y a des erreurs positives, celles qui permettent de s'interroger sur le réel, puisqu'en fin de compte, l'esprit scientifique se constitue « comme un ensemble d'erreurs rectifiées ». Mais accéder au véritable esprit scientifique n'est pas un exercice aisé. De même que la psychanalyse a pour but d'aider l'individu à se libérer de son passé psychologique, G. Bachelard considère qu'une « psychanalyse de la connaissance objective » peut permettre à la personne de se libérer des a priori, des croyances antérieures. C'est précisément le but qu'il fixe à son ouvrage : « Déceler les obstacles épistémologiques, c'est contribuer à fonder les rudiments d'une psychanalyse de la raison. » Cet état correspond à l'âme en mal d'abstraire.

Ces trois états sont proches, sans être confondus, des étapes de la conceptualisation par abstraction successive chez Piaget : empirique, réfléchissante puis réfléchie.

L'approche scientifique se constitue donc en rupture radicale avec nos modes habituels de pensée et d'expression. «L'opinion, dit Bachelard, pense mal ; elle ne pense pas ; elle traduit des besoins en connaissance. (. . .) On ne peut rien fonder sur l'opinion, il faut d'abord la détruire. Elle est le premier obstacle à surmonter.» Bachelard réfute donc ceux qui tiennent la perception immédiate pour un instrument de connaissance. C'est la capacité de formuler des interrogations pertinentes qui signe la marque du véritable esprit scientifique: «Toute connaissance est une réponse à une question. S'il n'y a pas eu de question, il ne peut y avoir connaissance scientifique. Rien ne va de soi, rien n'est donné. Tout est construit.»

5.2. L'obstacle épistémologique en didactique :

Bachelard s'adressait au départ aux scientifiques, aux savants. Par la suite, il transpose le phénomène de l'obstacle épistémologique à l'apprentissage des sciences. La didactique des sciences s'est emparée de cette notion, et l'a utilisée pour comprendre le processus d'apprentissage des sciences. Dans ce champ, la formation des concepts constitue une activité propre de l'apprenant où ce qu'il connaît déjà joue un rôle déterminant. C'est avec cette connaissance préalable qu'il va décoder l'information reçue et tenter de comprendre ce que l'enseignant attend de lui. Or, avant tout enseignement systématique, les élèves ont pratiquement des "idées" sur les objets d'étude, ou ils interprètent un phénomène donné ou une information entendue à travers un questionnement et un cadre de références qui leur sont propres. Ces éléments ont une certaine stabilité : un certain nombre d' "erreurs" de raisonnement ou d'idées "erronées" reviennent avec une reproductibilité déconcertante chez les élèves après *n* enseignements formels sur le sujet. Si l'enseignement n'en tient pas compte, les "idées" en place résistent et le savoir enseigné est éludé, transformé ou au mieux se "plaque" à côté du savoir familier.

Dans les recherches en didactique sur l'apprentissage des sciences, on fait l'hypothèse que les apprenants ont tendance à reproduire les erreurs commises par les savants à travers l'histoire.

Bon nombre de recherches ont cherché à comprendre la nature de ces erreurs. Beaucoup d'études les ont analysés en termes d'obstacles épistémologiques en référence à ceux qui sont identifiés par Bachelard.

Dans ces recherches, on a tendance à plaquer les obstacles identifiés par Bachelard aux erreurs commises par les élèves (Peterfalvi, 1997, Rumelhard, 1997, Martinand, 1982, 1998, et d'autres).

Le concept d'obstacle épistémologique chez Bachelard s'est révélé trop général. On n'arrive pas à le cerner dans le réel, chez les apprenants en sciences. Les études sur l'obstacle en sciences reproduisent les mêmes catégories que celles qui sont identifiées par Bachelard, et non celles qui sont propres à chaque domaine. En physique par exemple, c'est l'obstacle substantialiste qui revient le plus souvent. Après un grand nombre de recherches qui utilisaient les catégories identifiées par Bachelard, on s'est rendu compte que les difficultés rencontrées par les élèves et les erreurs commises dans une science ou dans un domaine ont des caractéristiques différentes que ceux que l'on rencontre dans une autre. De par son caractère trop général, ce concept ne permet pas d'analyser finement les erreurs chez les élèves, dans un domaine déterminé d'une science. Il se produit une rupture avec la théorie générale de l'obstacle épistémologique de Bachelard, analogue à la rupture avec la théorie générale de Piaget.

5.2.1. L'obstacle épistémologique chez Brousseau :

Brousseau est l'un des premiers à considérer l'apprentissage des mathématiques en termes d'obstacle et à appliquer cette notion à l'apprentissage d'un contenu spécifique.

Un des exemples d'obstacles noté par Brousseau qui est souvent cité et celui de l'acquisition des nombres décimaux : « les naturels fonctionnent comme des obstacles à la conception des rationnels et des décimaux ». Les décimaux sont considérés comme des naturels avec des virgules.

En plus des obstacles épistémologiques, Brousseau a identifié d'autres types d'obstacles :

— l'*obstacle ontogénique* est un obstacle lié au développement somatique (neurophysiologique) ; un enfant n'a pas accès à certains concepts tant que son système nerveux n'a pas atteint un certain niveau de maturation.

— l'*obstacle didactique* est un obstacle dû à des choix ou du système éducatif (transposition didactique) ou de telle ou telle stratégie d'enseignement. Ils sont inévitables car on ne peut pas supprimer les étapes, les approximations, les analogies plus ou moins pertinentes lors de l'apprentissage.

— l'*obstacle culturel* est un obstacle dû à une connaissance véhiculée par la culture de son milieu d'origine.

Dans l'apprentissage des mathématiques, pour Brousseau comme pour Vergnaud, un obstacle est une connaissance existante chez un sujet qui est en contradiction avec la connaissance attendue, à acquérir.

Plusieurs chercheurs en didactique des sciences substituent à cet obstacle général « l'obstacle local » désigné par « misconception ». C'est un terme anglais qui signifie littéralement « idée fausse ».

Une misconception est un obstacle local, une « idée fausse » relative à une notion, une prénotion, dans un domaine particulier, qui porte sur :

- le concept ;
- le raisonnement qui conduit à l'élaboration de ce concept et qui le mobilise.

Une misconception réfère à un contenu précis et à une situation déterminée. C'est généralement une connaissance qui est valide dans une situation ou une classe de situation donnée, et n'est plus valide pour d'autres situations. Dans la genèse conceptuelle, les misconceptions varient selon les formes de conceptualisation et le type de concepts visés.

5.3 . Obstacle épistémologique, formes de conceptualisation et types de concepts :

Dans la conceptualisation, les difficultés ne s'interprètent pas systématiquement en termes de misconception. Certaines difficultés sont conjoncturelles d'autres structurelles. C'est au niveau de ces dernières que l'on peut repérer l'obstacle. Par ailleurs, l'obstacle prend des formes particulières selon que la conceptualisation porte sur le développement d'un savoir ou d'un savoir-faire. Enfin, certains concepts, de par leur nature et la catégorie à laquelle ils appartiennent ou de leur niveau d'abstraction vont présenter des difficultés qui ne sont pas de la même nature. Pour comprendre cette différence nous allons procéder à trois distinctions :

- distinction entre l'élaboration par soi-même d'un concept et l'acquisition d'un concept élaboré par un autre ;
- distinction entre connaissances communes et connaissances scientifiques,
- distinction entre concepts catégoriels et concepts formels.

5.3.1. *Élaboration d'un concept et acquisition d'un concept :*

L'élaboration d'un concept (ou la formation d'un concept) est un processus inventif. Elle consiste à extraire les propriétés invariantes du réel, dans une interaction directe avec ce réel. C'est une construction progressive qui avance par paliers. C'est une construction qui

s'effectue généralement par l'activité cognitive spontanée. Chacun, par rapport à sa structure cognitive propre, aboutit à la formation spontanée de concepts. Cette élaboration cognitive donne lieu généralement à la construction de concepts catégoriels. Cette élaboration peut se passer d'une interaction immédiate avec l'entourage. Elle peut évoluer ultérieurement. Le concept catégoriel spontané est approximatif, déformé, voir totalement erroné. Il peut donner lieu à la construction d'un concept catégoriel scientifique, par un processus de prises de conscience successives. Un concept catégoriel scientifique est élaboré par un processus contrôlé et conscient.

L'acquisition d'un concept se situe différemment. Il ne s'agit plus d'identifier et d'extraire soi-même les propriétés du réel, mais *d'identifier la* combinaison d'attributs selon laquelle un concept est déjà défini, que ce soit par le dictionnaire, l'enseignant ou l'interlocuteur qu'on a devant soi. L'acquisition d'un concept nécessite une interaction verbale puisqu'il s'agit, justement, de vérifier la règle de classification déjà déterminée par d'autres.

L'acquisition d'un concept porte sur tous les concepts possibles : concepts pragmatiques, concepts communs, concepts scientifiques...

3.5.2. L'exemple de la difficulté dans la construction du concept de symétrie :

Vergnaud a cherché à comprendre comment des élèves construisent le concept de symétrie et comment ils l'énoncent dans deux situations d'une complexité différente. Son exemple témoigne de la difficulté que peut rencontrer un élève dans la construction d'un concept et dans le passage d'une connaissance opératoire à une connaissance prédicative.

Dans la première situation, qui est simple, il s'agit de compléter le dessin d'une forteresse en réalisant la réplique inversée par rapport à un axe vertical en pointillé du dessin proposé. Cette tâche qui semble a priori très simple mobilise un processus cognitif chez l'élève relativement complexe. En effet, il faut :

1/ d'abord comprendre l'énoncé ;

2/ ensuite agir pour réaliser le dessin demandé ; au cours de cette action les élèves construisent un schème adapté à cette situation;

3/ enfin produire un énoncé qui explique ce qui a été fait. La production de cet énoncé à la fin de l'exercice aide à comprendre ce qui a été réalisé. Cet énoncé permet de passer de la connaissance opératoire construite à une connaissance prédicative.

Vergnaud note que dans la construction du schème, il faut respecter certaines conditions : tracer des traits d'une certaine longueur, respecter les angles, actions guidées par le principe de conservation des segments (dont les unités discrètes sont les petits carreaux), des angles, etc. L'élève acquiert la notion de symétrie dans une situation particulière.

L'énoncé produit reste lié à la situation vécue et sera par exemple du type : *la forteresse est symétrique*, avec l'idée que le dessin réalisé est la « réplique » inversée du dessin donné. L'ensemble *est symétrique*. L'élève retient plusieurs détails de cette figure, mais ce n'est pas véritablement le concept général de symétrie. Dans la connaissance prédicative obtenue le prédicat est l'adjectif « *symétrique* ».

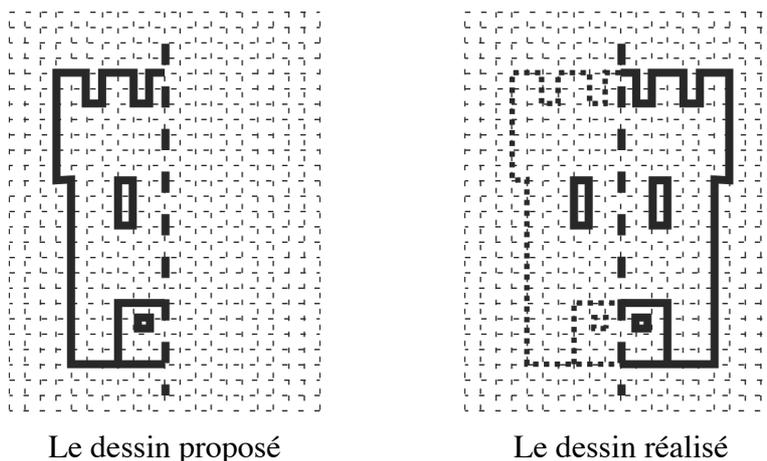


Figure 8 : Premier exercice proposé aux élèves « reproduire la réplique inversée, «symétrique», du dessin pour compléter la forteresse »

Dans la deuxième situation, il s'agit de réaliser le triangle symétrique à un triangle donné par rapport à un axe oblique. Il y a d'abord la reproduction de la connaissance construite précédemment. Cette connaissance s'appuie sur le prédicat « symétrique ». Ce qui donne : les deux triangles sont symétriques, ou le triangle symétrique $A'B'C'$ à réaliser sera symétrique au triangle ABC . Pour réaliser le triangle symétrique le schème précédent est mis à rude épreuve. L'action, dans cette nouvelle situation, est plus complexe que l'action précédente.

Dans cette nouvelle situation, une rupture s'opère par rapport à la première situation.

Il y a d'abord la mobilisation de la même connaissance prédicative. L'énoncé que l'on peut produire est le suivant : « *Le triangle $A'B'C'$ est symétrique du triangle ABC par rapport à la droite d* ». Mais la situation n'est pas la même. La symétrie n'est pas la même. L'action effectuée dans la première situation n'est plus adaptée à cette situation nouvelle. Pour réaliser le triangle symétrique, le schème précédent est mis à rude épreuve. L'action est plus complexe :

1. Il faut réduire le triangle à trois points. Ce qui est une abstraction non négligeable pour certains élèves, qui « voient » toute la figure comme une unité non décomposable.
2. La conceptualisation consiste à tracer un cercle passant par chacun de ces points, et dont le centre est le point d'intersection de la projection perpendiculaire à ce point, pour construire les segments AA' , BB' et CC' .

Ce qui constitue une rupture conceptuelle importante entre la première situation et la seconde, un « saut épistémologique ».

On réalise que, dans la symétrie, on conserve les longueurs et les angles. Le prédicat « symétrique » est transformé en objet de pensée « la symétrie ». On passe d'une connaissance opératoire « réaliser une réplique inversée par rapport à un axe vertical », à la construction d'invariants qui s'appliquent aux deux situations.

Sur le plan de l'énoncé, le prédicat est transformé en argument. La conservation des longueurs et des angles est alors une propriété de ce nouvel objet qu'est la « **symétrie** ». Cette propriété devient à son tour un objet de pensée. Ce qui constitue une nouvelle rupture. La symétrie se transforme en isométrie. L'accès au concept de symétrie s'exprime dans le 4^e énoncé suivant : *la symétrie est une isométrie*. En géométrie, l'isométrie est une transformation ponctuelle qui conserve les distances (distance par rapport à d entre A et A' , entre B et B' et entre C et C').

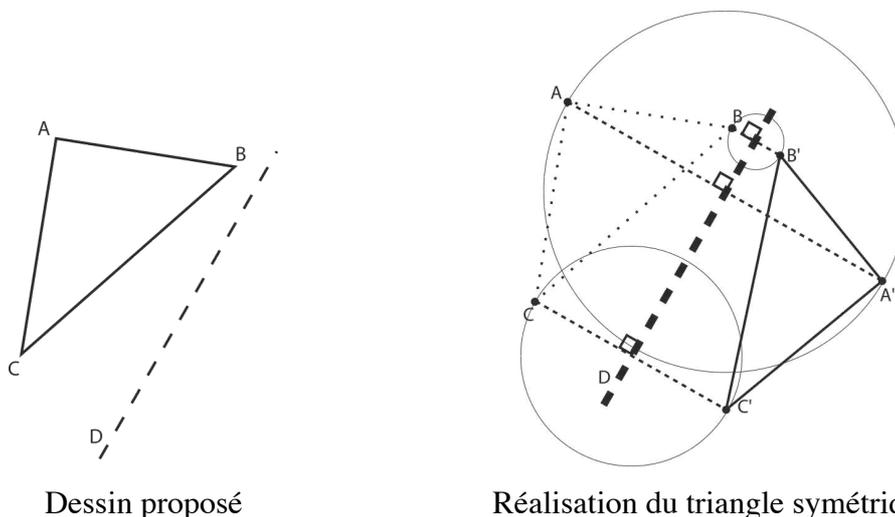


Figure 9. Deuxième exercice proposé aux élèves « réaliser un triangle symétrique au triangle donné (à gauche) par rapport à l'axe D »

Les ruptures observées sont le fait d'opérations sur des opérations, d'un retour de la pensée sur elle-même. Autrement dit, c'est une activité métacognitive où l'abstraction se détache des situations pour fonder un concept qui s'applique à tous les possibles, quelle que

soit la situation. On peut donc partir d'une situation simple et progresser par des ruptures successives, qui permettent d'accéder à des niveaux d'abstraction de plus en plus élaborés pour aboutir au concept général.

Le décalage entre la forme opératoire et la forme prédicative peut exister dans toutes les activités. Dans les activités où la verbalisation de l'action est courante, le décalage est réduit, les conceptualisations sont moins difficiles. Dans certaines professions, essentiellement manuelles, où la verbalisation n'est pas très courante, le décalage peut être important. Dans ce cas, les conceptualisations sont très difficiles. Une verbalisation introduit la médiation d'un tiers. Celle-ci joue une fonction essentielle dans la conceptualisation. Pour un élève, la médiation de l'enseignant lui permet d'accéder à un langage verbal, mais aussi à la possibilité de transformer la connaissance opératoire en une connaissance prédicative.

On observe dans cet exemple, que la réussite de la réalisation du dessin symétrique dans la première situation, correspond à l'acquisition d'une compétence initiale permettant d'accéder à la notion de « symétrique ». Cette première notion est investie dans la seconde situation pour élargir la compétence. Du point de vue de l'action, Pastré (1999a), en s'appuyant sur Piaget (1974) et sur Leplat (1985, 1995-2), considère que la conceptualisation relève de deux mouvements successifs : d'abord un mouvement de désincorporation de la compétence, suivi d'un deuxième mouvement de décontextualisation. Celle-ci n'est pas possible dans la première situation. Il faut que l'élève atteigne un seuil au-delà duquel cette décontextualisation devient possible. À ce sujet, Vygotski nous dit, « *Si le développement du concept scientifique et celui du concept quotidien suivent bien des voies opposées, ces deux processus sont cependant liés l'un à l'autre par des rapports internes et très profonds. Le développement du concept quotidien doit atteindre un certain niveau pour que de manière générale l'enfant puisse assimiler un concept scientifique et en prendre conscience. L'enfant doit être parvenu dans ses concepts spontanés jusqu'au seuil au-delà duquel de manière générale la prise de conscience devient possible.* »³⁷ (Vygotski, 1997),

L'accumulation de ruptures dans les formes opératoires et dans les formes prédicatives des connaissances mathématiques engendre des difficultés pour les élèves.

Pour Vergnaud (1990b, 1985), « Tous les registres de l'activité sont concernés par le cadre théorique des schèmes, des champs conceptuels et des relations signifiants/signifiés. »

Nous avons vu plus haut, que dans un champ conceptuel, chaque concept s'insère dans un réseau conceptuel où chacun des concepts s'appuie sur les autres pour puiser un sens. À ce

37 - Vygotski L. p. 371-372

niveau se produit également une autre rupture. Il s'agit d'ajuster le sens nouveau acquis au sens donné par les autres concepts. Il y a une réorganisation interne des significations émanant des relations entre les différents concepts.

La démarche que nous venons de voir est inductive. Ce qu'il faut noter dans l'induction, c'est qu'on ne peut pas aboutir à l'universalité à partir d'un cas particulier, voir même de quelques cas particuliers, car on n'a pas la possibilité de faire toutes les expériences possibles et de vérifier empiriquement la légitimité d'une loi universelle. Cependant, pour Bachelard, Kuhn ou Popper, entre autres : une théorie scientifique n'est « vraie » que temporairement, jusqu'à ce qu'une autre théorie la remplace. Ce que le raisonnement inductif permet d'atteindre, ce n'est pas la totalité d'une réalité, ni une explication absolument certaine de la nature, mais de simples hypothèses, qu'on n'aura jamais la possibilité effective de vérifier par l'examen de toutes les situations possibles.

Dans l'exemple ci-dessus, nous avons une conceptualisation qui s'appuie sur l'expérience sensible. La symétrie est perceptible. Elle est difficile à acquérir pour des élèves du niveau élémentaire ou même secondaire, mais on peut y accéder par la perception visuelle. Les invariants sont perceptibles. Les élèves ne pourront jamais faire l'expérience de toutes situations permettant de vérifier la validité de cette loi universelle. Mais à partir d'un certain nombre d'expériences, l'énoncé de la loi selon laquelle « la symétrie est une isométrie » se note à chaque fois et le concept de symétrie est acquis.

5.3.3. *Connaissances communes et connaissances scientifiques :*

Les connaissances scientifiques, comme les connaissances communes ont pour points communs d'être construites dans la recherche d'une réponse ou d'une solution à un problème, d'être toutes les deux explicatives et prédictives. Mais elles présentent des différences fondamentales.

Une connaissance commune est, généralement, dans sa construction et son fonctionnement implicite. Elle n'est pas questionnable par essence, et n'est que partiellement structurée et partiellement cohérente. Cette caractérisation de la connaissance commune est un peu réductrice. Mais elle permet de souligner les différences essentielles qu'elle a par rapport à une connaissance scientifique. Par contre, *la connaissance scientifique* est généralement explicite ; elle est, par essence, questionnable, entièrement structurée et cohérente.

L'unité de base dans une connaissance est le concept ou la notion. Ou, pour formuler cela autrement, les connaissances font appel aux concepts et aux notions. Il est d'usage de

distinguer les concepts naturels, ceux que les individus forment dans leur vie courante et les concepts scientifiques ou rationnels. Les modes de formation de ces deux types de concepts ne se recouvrent pas.

Le terme de concept est ambigu. Selon certains, il serait a priori, c'est-à-dire inné et non tiré de l'expérience, selon d'autres, il est le produit d'apprentissage intelligent. Le concept, selon l'approche constructiviste, notamment chez Piaget, n'est pas inné mais construit dans l'expérience. En psychologie du développement cognitif, le concept est appris. Pour Piaget, à l'origine il y a des schèmes d'action qui, par un travail d'assimilation et d'accommodation, se transformeraient en schèmes conceptuels.

Le terme de concept a tendance à être employé pour désigner toutes les formes de connaissances. En sciences, le concept a une définition précise. C'est un outil précis pour désigner les phénomènes que l'on étudie et les résultats de cette étude. Cette définition du concept s'applique aux sciences physiques. Nous l'avons choisie pour deux raisons : Tout d'abord, parce que le domaine dont il est question dans cette étude est celui de la physique. Deuxièmement, parce que les sciences physiques servent généralement de modèle à plusieurs autres sciences qui s'intéressent à la connaissance du réel et qui adoptent leurs méthodes et leur épistémologie commune. Un concept y est défini par un ensemble de propriétés, dans un champ déterminé de la physique. Son domaine de définition et le domaine de validité de ses propriétés sont clairement limités. Il possède une dénomination explicite, en ce sens qu'il renvoie, sans équivoque, à un objet et un seul, et n'est pas polysémique. Le sens d'un concept en physique n'est pas exclusivement intrinsèque. Il puise dans d'autres concepts avec lesquels il entretient des relations étroites. Les différents concepts du champ de la physique envisagé s'articulent entre eux pour constituer l'expression d'une théorie. Les relations qu'entretiennent entre eux ces concepts sont strictement établies et possèdent un domaine de validité bien défini. Elles contribuent à éclairer la signification de ces concepts. On ne peut guère séparer d'ailleurs la définition d'un concept des relations qu'il entretient avec ses voisins. Le concept est donc l'unité de base de la connaissance scientifique. Remarquons enfin que la plupart des concepts utilisés en physique et dans les sciences dites (pour cette raison) "exactes" sont des concepts quantitatifs auxquels correspondent donc des grandeurs mesurables. Dans les sciences humaines, il est parfois difficile de quantifier les phénomènes.

Par rapport à la quantification en physique, on a tendance à passer directement à l'apprentissage de la formalisation mathématique d'un phénomène physique, sans passer par tout le processus nécessaire à sa compréhension. Yoav Ben-Dov (1995) se demande si on peut comprendre la physique sans aucun bagage en mathématique. Il pense que la physique se raconte avant de se formaliser.

La *notion* recouvre un ensemble de propriétés appartenant généralement à plusieurs concepts différents du physicien. Alors que les domaines de validité des propriétés d'un concept coïncident et fixent les limites du champ d'application du concept, les domaines de validité des propriétés d'une notion sont, d'une part souvent plus restreints que ceux du concept physique auquel elles ont été empruntées et, d'autre part, il ne se recouvrent pas toujours totalement sans pour autant être forcément disjoints. Ces domaines de validité des propriétés de la notion ont des limites à la fois floues et non explicitement définies par le sujet lui-même. Dans ces conditions, le champ d'application de la notion doit être considéré comme l'enveloppe des domaines de validité de ses différentes propriétés. Ce processus de construction peut être dynamique et permettre à la notion de « s'adapter » et ainsi d'élargir son champ d'application. Enfin la notion ne recouvre pas nécessairement une grandeur mesurable. La notion est l'outil le plus souvent utilisé dans le savoir commun pour décrire des phénomènes.

Par exemple, le terme d'intelligence, tel qu'il est employé dans le langage courant correspond à une notion. Celle-ci regroupe certaines propriétés de ce "concept" qui recouvre l'ensemble des aptitudes nécessaires à la réussite des tests permettant de définir le quotient intellectuel (Q.I) d'un individu. Elle a emprunté aussi certaines propriétés à cet autre "concept" qui correspondent aux aptitudes à réussir tel ou tel test psychologique, etc. Mais l'intelligence est aussi, parfois, la qualité de celui qui réussit scolairement et socialement, et la qualité de celui qui est habile en affaire, etc.

Le sens d'une notion peut varier d'une tranche d'âge à l'autre, d'une classe à l'autre ou même d'un individu à l'autre au sein d'une même classe et surtout d'un problème à l'autre pour un même individu. C'est en cela que les domaines de validité des propriétés de la notion possèdent des limites floues et que le champ d'application de la notion doit plutôt être considéré comme l'enveloppe de ces domaines de validité.

Les concepts (sous-entendu scientifiques) sont rigoureusement définis, et leurs propriétés rigoureusement vérifiées et identifiées. Les concepts prennent vraiment leur sens et déploient leur efficacité dans la plupart des sciences lorsqu'ils s'articulent au sein d'une théorie. Celle-ci constitue l'aboutissement provisoire de la démarche de la science ; elle définit un domaine d'étude pertinent du savoir scientifique.

5.3.4. Concepts catégoriels et concepts formels³⁸:

38 - Pour la distinction entre ces deux catégories de concepts en physique, voir Lemeignan et Weil-Barais (1993) Chap. 3, Les concepts.

Un concept catégoriel est accessible à la perception. Ce qui n'est pas le cas d'un concept formel.

Un concept catégoriel résulte de l'extraction de propriétés communes du réel, pour former une classe. C'est le résultat d'une démarche inductive. C'est une abstraction du réel à partir du réel. Ce processus correspond à une propriété de la pensée. Pour penser le monde, l'homme a cette faculté de saisir la diversité par des caractéristiques communes et de penser les objets, les événements, les situations, les phénomènes par une entité mentale qui ne retient que ce qui leur est invariant. Là aussi, l'homme commun construit des concepts catégoriels selon son expérience du monde. Les concepts catégoriels qu'il construit des objets, des événements, des situations, des phénomènes, ont une portée limitée du fait qu'il ne peut faire l'expérience de tout ce qui existe dans le monde. Par ailleurs, les propriétés qu'il retient sont généralement orientées par un intérêt personnel et par l'action qu'il a sur le monde. Par contre un concept catégoriel scientifique saisit les objets, les événements, les situations, les phénomènes, par leurs propriétés essentielles et invariantes quel que soit le cas.

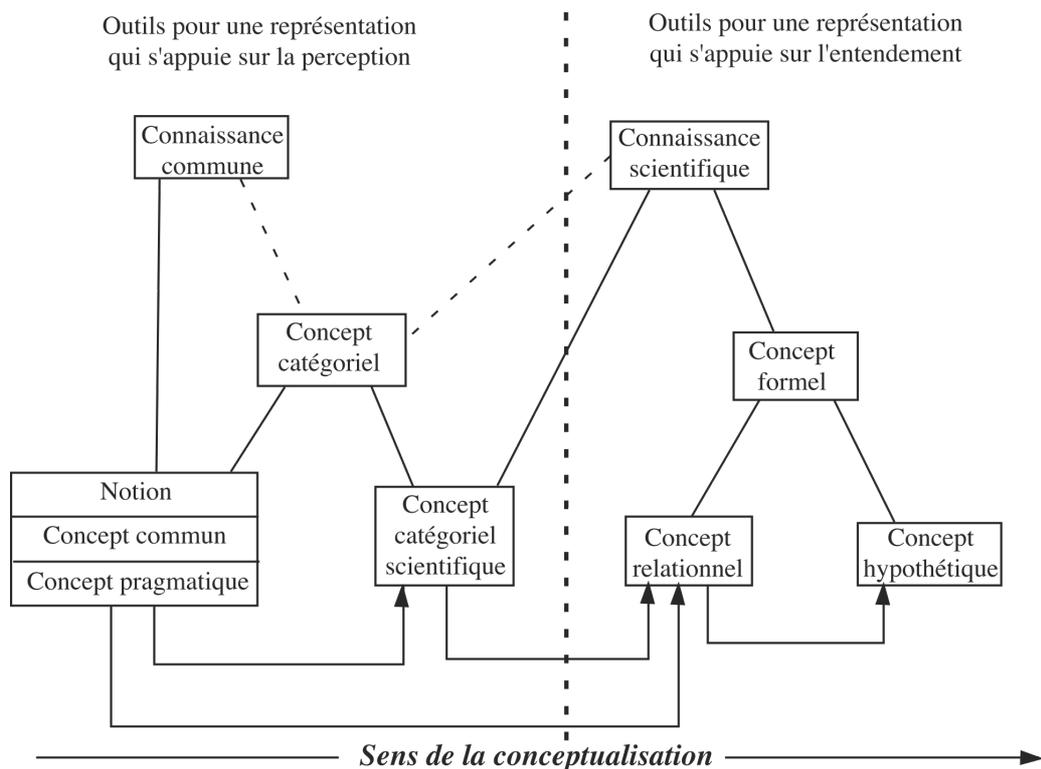


Figure 10 : Distinction entre concepts catégoriels et concepts formels

En sciences, tous les concepts ne trouvent pas leur origine dans l'expérience sensible. Certains concepts sont dotés d'attributs et d'invariants non perceptibles : les concepts formels.

*Les concepts formels*³⁹ ne sont pas accessibles à la perception. Un concept formel n'a d'existence que dans la pensée. On y distingue deux grandes catégories : les concepts relationnels et les concepts purement hypothétiques.

Les concepts relationnels sont définis par leur relation avec d'autres concepts. C'est le cas de certaines grandeurs en physique comme le concept de Force ou d'énergie.

Les concepts hypothétiques résultent de la pure invention pour rendre compte de certain phénomène ou état, comme le concept de système, d'état de système, etc. L'état d'un système n'a d'existence que parce que, par la pensée, nous procédons à un découpage temporel des événements et que nous construisons une description de l'objet pendant un laps de temps où le système est supposé être dans un état stable. L'état d'un système est une construction pure de l'esprit comme les systèmes eux-mêmes (Lemeignan et Weil-Barais, 1993).

En physique, et particulièrement en thermodynamique, domaine dont il est question ici, les concepts utilisés sont des concepts formels.

Dans l'acquisition du savoir scientifique propre à un domaine, tout le problème est de saisir les propriétés d'un concept qui ne peut être assimilé que dans sa mise en relation avec d'autres concepts, c'est-à-dire au sein d'une théorie, avec tous les problèmes connexes, relatifs aux systèmes symboliques qui leur sont liés et les significations multiples des signifiants qui les expriment. Vergnaud estime que chaque connaissance n'acquiert un sens que par rapport à des situations vécues. Ce qui veut dire que la connaissance construite ne résulte pas simplement de la spécification des invariants d'un concept, il faut aussi que celui-ci soit mis en jeu dans des situations déterminées, sinon il va demeurer sous forme d'informations enregistrées en mémoire, sans signification précise pour le sujet. La véritable signification d'un concept est celle qu'il tire des situations où il a été mis en jeu. Autrement dit, un concept a un sens lorsqu'il prend la forme opératoire.

5.3.5. Raisonnement spontané (ou naturel) et raisonnement canonique :

Dans la production des connaissances, le raisonnement intervient. Celui-ci est l'activité intellectuelle par laquelle l'homme utilise des informations à sa disposition pour produire des connaissances nouvelles. Le raisonnement peut être explicite ou implicite. Le raisonnement explicite est celui que l'on énonce dans un discours argumentatif ou démonstratif ou dans l'énoncé d'une preuve. Le raisonnement implicite n'est pas toujours conscient : le sujet effectue une suite d'inférences non exprimées. Le raisonnement est étudié par les logiciens, sans tenir compte de sa réalité chez des individus, pour formaliser les règles valides de la

39 - Cassirer E. (1977), a beaucoup réfléchi aux concepts en physique et aux processus de pensée mis en jeu pour les construire. Il propose de désigner cette catégorie de « concepts formels ».

déduction. Cette formalisation a longtemps servi de norme pour évaluer les capacités de raisonnement chez l'individu réel. Dans cette approche normative, le raisonnement chez celui-ci était évalué en termes de dysfonctionnement ou de retard. Actuellement, cette approche est remise en question en psychologie. On s'intéresse plutôt à la valeur fonctionnelle des raisonnements pour les individus. On distingue les raisonnements ayant cours dans la vie quotidienne, qui répondent à des critères pragmatiques, de ceux qui obéissent aux règles établies et aux critères de vérité. L'hypothèse actuellement partagée par un grand nombre de psychologues est celle qui soutient que dans la vie quotidienne on a tendance à produire des raisonnements spontanés (ou naturels) déterminés par le contexte, la situation et le but, d'une part, et par les capacités cognitives « naturelles » chez l'homme, d'autre part. Cette hypothèse conduit à penser que le raisonnement déductif n'est pas naturel. C'est un raisonnement qui n'est pratiqué couramment que par certaines catégories professionnelles, les scientifiques, et lorsqu'il est mis en œuvre, il est construit à partir du raisonnement naturel. Ce raisonnement est effectué pour contrôler la validité des conclusions que produisent les scientifiques.

Dans les raisonnements, on oppose les raisonnements canoniques aux raisonnements « spontanés » ou « naturels ». Les deux types de raisonnements canoniques admis sont le raisonnement déductif et le raisonnement inductif ou expérimental. Les règles auxquelles ces deux raisonnements obéissent ne font pas l'objet d'un consensus dans la communauté scientifique. Cependant, pour le contrôle de la validité des résultats d'un raisonnement dans la production des connaissances scientifiques, ces deux types de raisonnement sont les seuls admis. Ce sont des raisonnements sûrs : si les règles sont utilisées correctement, ils débouchent sur des inférences certaines. Généralement, ces deux types de raisonnement sont combinés. Le raisonnement spontané est jugé non valide. Cependant, selon J-F Richard (1987), « La logique naturelle est une logique d'action, une logique de la vérification et une logique de la déduction mais la déduction est subordonnée à la vérification et la vérification est subordonnée à la réussite de l'action ». Ce qui tend à soutenir l'hypothèse d'une continuité entre le raisonnement naturel et le raisonnement canonique. C'est aussi le point de vue de Vergnaud qui tire la connaissance de l'action pour constituer une connaissance opératoire, et qui tire de celle-ci une connaissance prédicative, connaissance qui peut être soumise au contrôle de la déduction et de l'induction, dès lors qu'elle est énoncée, et évoluer, sous certaines conditions, vers une connaissance scientifique.

Par rapport au raisonnement spontané, on ne sait pas encore beaucoup de choses. Le raisonnement analogique mobilisé dans l'action, est considéré comme un raisonnement

spontané. En didactique des sciences, on a identifié quelques raisonnements dans le cadre des recherches sur l'obstacle épistémologique à l'acquisition des connaissances scientifiques.

5.4. Quelques exemples de misconceptions en didactiques des sciences :

En didactique des sciences, l'hypothèse de l'apprenant vu comme une « tabula rasa » est totalement rejetée. Les travaux actuels s'accordent massivement sur l'aspect constructiviste de l'acquisition des connaissances.

Nous avons noté plus haut que la prise de conscience de l'importance des contenus dans les modes de pensées et les difficultés d'apprentissage ont conduit à une rupture avec la théorie générale de Piaget. Ce fut le point de départ d'un ensemble de recherches en didactique des sciences.

Le constat du fait que l'obstacle épistémologique de Bachelard correspond à une catégorie générale ne permettant pas d'analyser finement les difficultés des élèves dans des domaines spécifiques, va conduire à rompre avec cette notion générale. L'obstacle épistémologique a permis de révéler un phénomène dont il faut tenir compte dans l'apprentissage. Mais ce concept tel qu'il est proposé par Bachelard s'avère inadapté à l'analyse des apprentissages des contenus spécifiques en situation. C'est à partir de ce constat qu'ont émergé et se sont développées des recherches sur les « conceptions », « raisonnements spontanés » ou « naturels », « idées naïves », « misconceptions », en mécanique, sur la lumière, la chaleur et la température, sur l'énergie, sur les circuits électriques et électroniques, etc. On ne peut pas rendre compte ici de toutes les recherches sur ces questions. Nous ne présenterons que quelques exemples d'études sur les misconceptions pour illustrer les difficultés rencontrées dans l'apprentissage des concepts scientifiques et les modes de pensée observés dans ces apprentissages spécifiques.

5.4.1. Exemple de misconceptions portant sur le concept de chaleur :

Tiberghien (1989) a observé chez une élève sa conception des phénomènes thermiques. Elle aborde, au départ le problème thermique en termes de « chaud » et de « froid » : « *La matière pour le glaçon intervient. Le verre en carton garde la chaleur. Pour l'eau chaude, c'est la même chose* ».

MATERIAU	→	GLAÇON (ou EAU CHAUDE)
	agit sur	

Après quelques expérimentations où elle teste le glaçon sur des morceaux de cuivre et de coton, elle dit : « *Le froid du glaçon s'imbibe dans la matière (dans le cuivre) et s'en va et là (coton) il le garde. Celle-là (coton), la matière garde plus la chaleur que celle-là (cuivre). Ici (cuivre) ça va s'en aller, la chaleur ou le froid* ».

GLAÇON	→	MATERIAU	→
donne	froid	reçoit ou transmet	

Le glaçon donne du froid. Le pull en coton donne du chaud. Cette élève utilise essentiellement les propriétés du matériau. C'est de l'ordre de la représentation figurale, trop engluée dans le sensible.

La liste de ces exemples est longue. Plus on descend dans le niveau de granularité, plus on est étonné des éléments qui fondent les conceptions des phénomènes chez les élèves. Ces conceptions varient selon les sujets, les matières enseignées, les domaines d'applications, les situations à traiter. Ces conceptions posent un problème à l'enseignement et à l'apprentissage des concepts scientifiques. Le plus souvent, ceux-ci sont abordés avec des conceptions issues de l'expérience. Or, comme nous l'avons souligné ci-dessus, la plupart des concepts en sciences, notamment en physique, sont des concepts formels qui n'ont qu'un lien indirect avec l'expérience. Il est difficile pour l'élève d'y accéder seul, par soi-même, à partir de son expérience.

5.4.1. Exemple de misconceptions portant sur les raisonnements :

5.4.1.1. Raisonnement local et raisonnement séquentiel :

Dans sa thèse, Closset J-L (1983) a étudié le raisonnement en électrocinétique chez des élèves du 1^{er} cycle en sciences agronomiques au cours de cinq séances de travaux pratiques d'électricité. Les raisonnements observés sont ceux qui sont mis en jeu par les élèves dans la confrontation à diverses situations représentées par un dessin d'un circuit électrique. Nous présentons ici deux de ces situations :

1^e situation :

Il s'agit d'un circuit composé d'une pile, sur lequel sont disposées trois ampoules 1, 2 et 3.

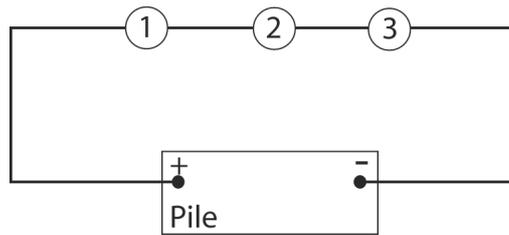


Figure 11. Schéma extrait de Closset, Thèse, Figure 8, p. 83

Les élèves doivent décrire ce dispositif électrique et répondre aux questions suivantes :

Les ampoules de ce circuit sont toutes identiques :

- vont-elles briller toutes de la même façon ?
- l'une ou l'autre va-t-elle briller différemment ?
- si oui laquelle ?⁴⁰

Ces questions sont posées à des élèves qui n'ont aucun enseignement en électricité et à des élèves en fin du même cursus de l'enseignement d'électrocinétique.

Closset note que les propriétés que les élèves attribuent au circuit ne sont pas celles des physiciens. Pour les élèves, la pile impose un débit au circuit, qui est modifié. Tout se passe comme si la pile constituait une réserve de courant laissant s'écouler celui-ci à débit constant dans le circuit où il se modifie à l'occasion des « obstacles rencontrés » (une résistance, etc.).

Les résultats qui nous intéressent ici sont ceux concernant les raisonnements mobilisés pour répondre à ces questions.

Closset (1983) constate que le raisonnement est « monotonnel ». Les notions en cause évoquées le plus souvent sont le “courant”, l’ “électricité” ou l’ “énergie”. Les élèves ont une perception séquentielle du circuit. Le comportement du circuit est le fruit des comportements des composants individuels qui, mis bout à bout, donne le comportement général du circuit. Ce raisonnement se pratique en suivant le circuit à partir de la pile sans tenir compte d'aucune influence de l'aval sur l'amont. Ainsi le circuit n'est pas considéré comme un système et une lecture séquentielle dans le sens du courant est opérée.

Closset note dans sa première observation :

- un raisonnement initial à caractère local qui consiste à considérer chaque composant (1 ou 2 ou 3) à part, isolé du reste ;
- un raisonnement séquentiel dans lequel l'élève considère l'ensemble, séquence après séquence ;
- un raisonnement à courant constant qui introduit la simultanéité du courant dans tout le circuit.

40 - nous ne discuterons pas ici de la validité de ce questionnaire qui nous semble introduire des biais et suggérer des réponses. Ce qui nous intéresse ce sont les raisonnements mobilisés.

Dans l'enchaînement de ces raisonnements, il a observé que certains élèves sont passés du raisonnement local, à un raisonnement à courant constant sur l'ensemble, et d'autres sont passés directement du raisonnement local au raisonnement systémique. Un seul élève est passé par le raisonnement séquentiel.

2^e situation :

Dans cette situation nouvelle, on a introduit un circuit parallèle sur lequel sont disposées les deux ampoules 2 et 3.

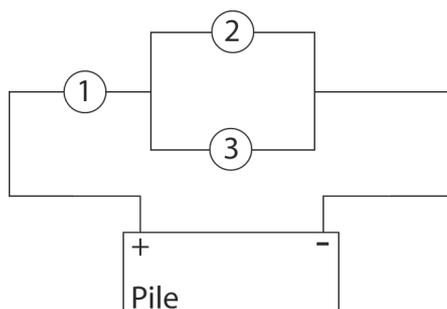


Figure 12. Schéma extrait de Closset, Thèse, Figure 18, p.129

Les élèves abordent cette nouvelles situation selon le même raisonnement séquentiel : le courant est transmis à l'ampoule 1, ensuite il doit se diviser en 2 pour bifurquer vers l'ampoule 3 et 2.

Closset note que la majorité des élèves ont un raisonnement initial identique qui est un raisonnement local. La plupart d'entre eux adoptent à la fin un raisonnement systémique.

Dans leurs cheminements, certains sont passés par le raisonnement à courant constant. Un seul élève est passé par le raisonnement séquentiel et deux seulement sont passés directement du raisonnement local au raisonnement systémique

Closset a suivi ces raisonnements durant tout le cursus scolaire. Il a observé que les effets du raisonnement séquentiel peuvent s'estomper dans des cas particuliers au cours du cursus, mais le raisonnement lui-même ne disparaît pas. C'est ce qu'observe également Rouffiac-Missionier (Thèse, 2002). On retrouve ce raisonnement dans des situations nouvelles moins familières, par exemple dans la 2^e situation, chez des étudiants qui l'avaient abandonné à la fin de l'apprentissage de la première situation.

Rouffiac-Missonier, dans sa thèse sous la direction de Closset, a suivi l'évolution des raisonnements dans le cheminement des élèves sur toute l'année.

Elle a constaté la mobilisation du raisonnement séquentiel seul, en début d'année, chez 50 % de la population observée (62 élèves).

Pour certains élèves de cette population observée, ce raisonnement séquentiel est mêlé à d'autres raisonnements.

Plus du tiers de cette population ont adopté un raisonnement systémique en fin d'apprentissage, dont certains sont passés directement du raisonnement séquentiel au raisonnement systémique, d'autres sont passés par le raisonnement à courant constant. Trois élèves de cette population, qui au départ avaient un raisonnement mêlé, sont passés par le raisonnement dit « à courant constant »

Ces observations indiquent que le raisonnement systémique n'est jamais mobilisé d'emblée dans une situation nouvelle. Ce qui conforte l'hypothèse que ce n'est pas un raisonnement naturel ou spontané. Il indique aussi que face à une situation nouvelle on a tendance à mobiliser le raisonnement séquentiel, en vue simplement de réduire la complexité de la situation, puisqu'on l'abandonne par la suite pour d'autres types de raisonnements plus élaborés : raisonnement à courant constant. Closset estime que ce dernier raisonnement introduit le raisonnement systémique.

5.4.1.2. Raisonnement linéaire causal :

Le raisonnement linéaire causal est une autre forme de raisonnement identifié par différents auteurs (Viennot L., Maurines L., Rozier S., Fauconnet) dans des domaines différents. Dans ce raisonnement, on ne tient compte que d'une relation binaire entre variables, qui sont mises bout à bout dans une chaîne explicative linéaire. Chaque maillon ne mentionne qu'une seule grandeur ou un seul phénomène simple.

Fauconnet (1981-1983) à propos des ressorts mis bout à bout, sur lesquels on exerce une traction sur l'extrémité inférieure (F_{ext}), les sujets estiment que cette traction étire le ressort inférieur qui transmet au bout de jonction des ressorts une force qui tire à son tour sur le ressort supérieur.

Rozier (1989), dans son étude, constate le même raisonnement linéaire et causal en thermodynamique. Dans la situation proposée aux sujets, il s'agit d'expliquer ce qui se passe lorsqu'on chauffe un gaz parfait sous pression (p) constante. L'explication du phénomène qu'en donnent 40 % des élèves peut se résumer comme suit :

apport de chaleur \rightarrow T augmente \rightarrow P augmente \rightarrow V augmente

Figure 13. Enchaînement de causalité dans le raisonnement linéaire causal en thermodynamique

Au début de ce raisonnement, le volume est bloqué. L'apport de chaleur élève la Température qui élève à son tour la pression, qui entraîne une augmentation du volume. On

est loin de l'idée que les variables température, pression et volume changent simultanément dans une évolution contrainte en permanence par la même relation. Chaque maillon de la chaîne explicative lie une seule variable à une autre pour former un réseau de détermination linéaire représenté ici par les flèches. Les variables sont bien toutes là, mais leurs relations n'expriment pas un système. À noter que pour exprimer ces relations de déterminations, les termes employés sont : « donc », « ensuite », « puis »...

Rozier (1989) soutient que cette tendance de la pensée dépasse largement le cadre de la thermodynamique.

Menigaux (1991) constate aussi que les sujets ont des difficultés à envisager simultanément une rotation et une translation d'un même mobile. On la transforme en une succession de mouvements simples.

Dans le raisonnement linéaire causal, les bonnes variables sont traitées l'une après l'autre, et non simultanément. Ce qui est aussi une manière de réduire la complexité d'un système.

5.4.1.2. Raisonnement à variables réduites :

Crépault (1989) a étudié la relation qui lie par exemple la vitesse, la distance parcourue et la durée de parcours chez des enfants et des adultes. Il a constaté que l'ensemble de ces relations n'est pas pris en compte simultanément dans l'analyse. Les énoncés fréquemment donnés sont du type : « *plus vite, donc plus loin* », « *plus vite, donc moins de temps* ». Dans la plupart des énoncés, on ignore la troisième variable. Il y a une tendance à la réduction fonctionnelle des variables.

Viennot (1979, 1989), a observé le même raisonnement dans l'explication de la vitesse d'un mobile⁴¹. La question portait sur la force exercée sur les six balles du jongleur à un point fixé dans un cliché photographique. « *Les forces exercées sur chaque balle (ou chaque masse) sont-elles identiques à l'instant du cliché ?* » la réponse exacte est OUI : « *Oui, les forces sont les mêmes, seul le poids intervient* », « *Oui, l'altitude est la même* ». Chez 40 % des élèves de terminale D et 60 % des élèves de première année de sciences, la réponse est NON. Les arguments justifiant ce non sont les suivantes : « *Le poids s'exerce sur chacune des balles, mais diffère selon les balles.* » « *L'accélération varie selon les différents mouvements des balles* ». Les étudiants établissent une relation pseudo-linéaire entre force (F) et vitesse (V). Ainsi la réduction fonctionnelle des variables conduit à des réponses erronées.

41 - Viennot, cité par Crépault J. (1990), Les conceptions de l'environnement physique, in Richard et al., Traité de psychologie cognitive, t2, Dunod, p. 53-54

Viennot⁴² note une autre forme de réduction fonctionnelle : c'est la transformation d'une des variables en constante. Exemple : pour la formulation correcte suivante : « *la résistance ... dépend de la température* », les sujets donnent l'énoncé suivant : « *à température donnée ... la résistance ... est constante* ». Ou encore pour le phénomène de vitesse de la lumière : « *pour un milieu donné ... la vitesse de la lumière est une constante* ». Ces énoncés des sujets peuvent être exprimés dans la formulation générale suivante : « *à telle grandeur donnée ... telle autre est une constante* » au lieu de dire « *telle grandeur dépend de telle autre grandeur* ». Sans oublier le temps comme variable implicite des fonctions dites constantes.

Viennot estime que l'on commence à comprendre véritablement un domaine, de la physique en particulier, quand on maîtrise un tant soit peu les dépendances fonctionnelles.

Ces trois types de raisonnement peuvent être combinés par les élèves dans une même analyse d'un système. Nous venons de voir que dans le raisonnement linéaire causal, on ne prend en compte que deux variables. Ils peuvent être aussi enchaînés l'un après l'autre.

Ces quelques exemples indiquent que la pensée spontanée ou naturelle ne fonctionne pas sur le mode de la logique formelle. Celle-ci est généralement considérée comme une norme pour évaluer la première. Or, plusieurs auteurs ont mis en évidence le fait que les concepts spontanés et les raisonnements spontanés sont assez courants, y compris chez des sujets rompus au raisonnement systémique. La construction de ce raisonnement se fait par étapes. Ces raisonnements sont tantôt considérés comme des obstacles, tantôt comme des raisonnements intermédiaires, raisonnement qui constituent un passage obligé pour comprendre un système. Cela se note notamment dans la mise en œuvre d'un raisonnement en situation.

Dans un raisonnement, il y a toujours des concepts, en tant qu'unité, qui en font partie intégrante. Ces concepts recèlent aussi de conceptions communes qui influencent le raisonnement.

Les concepts qui font l'objet d'une transmission didactique s'inscrivent dans le cadre d'un système abstrait et cohérent qui relève d'une construction scientifique d'envergure, débordant dans leur référence les propriétés concrètes de l'environnement telles qu'elles apparaissent à un sujet dans son expérience immédiate. Les généralisations qu'ils rendent possibles se forment en référence au système abstrait qui les contient, dont elles suivent la logique et les méthodes propres (Yoav Ben-Dov, 1995). Leur acquisition n'est pas facile. L'accès à ces concepts n'est pas évident. Pour chaque domaine de concepts, il y a des

42 - Viennot, synthèse, p. 133

obstacles spécifiques. Le plus souvent, ces obstacles sont le fait de la persistance de conceptions bien ancrées dans l'expérience.

6. L'APP observé est une genèse de l'objet technique :

Le modèle épistémique de l'objet technique n'est pas un modèle qui se construit dans l'usage. C'est un modèle qui se construit dans la conception ou la re-conception de l'objet. Dans le premier cas, l'objet n'existe pas encore. Dans le deuxième, l'objet existe, il faut le re-concevoir pour l'améliorer. C'est ce que Béguin appelle la conception continuée dans l'usage. Dans le cas présent, celui de l'APP, l'objet existe, mais il ne s'agit pas de le re-concevoir pour l'améliorer, les élèves ne disposent pas d'informations sur son usage. Il s'agit de le re-concevoir à des fins didactiques. Sa re-conception s'arrête à la compréhension de son fonctionnement. Quelle approche pour le comprendre en vue d'en construire un modèle épistémique ?

Pour Simondon (1989), l'objet technique n'a pas d'existence sans l'homme. C'est l'homme qui le conçoit, l'invente et le réalise. Simondon (1989) distingue deux modes de relation de l'homme à l'objet qui conduisent à deux connaissances différentes de celui-ci : le mode par l'usage et le mode par la compréhension scientifique. Le mode de relation par l'usage, qu'il considère comme un mode mineur, est sans intérêt pour la connaissance véritable de l'objet ; le mode de relation par la connaissance scientifique, qui est le mode majeur, permet de saisir l'objet dans ses fondements essentiels et d'établir une connaissance valable de l'objet. En parallèle, il distingue dans cette connaissance de l'objet, une approche par la forme et une approche par les éléments qui le fondent. Pour comprendre ce qui fonde l'objet technique, il estime qu'il faut étudier sa genèse. Dans l'étude de sa genèse, au lieu de l'aborder dans son état stable tel qu'il apparaît dans sa forme individuée, il propose de partir du processus conduisant à cet état stable, en considérant celui-ci comme étant à une phase de ce long processus. Tout objet technique constitué n'est qu'à une phase particulière de sa genèse. Il est amené à évoluer, à changer et à se transformer. Tous les états de l'objet constitué ne sont que des états métastables.

Simondon conçoit l'unité de l'objet comme une totalité (au sens de M. Mauss), qui ne réduit pas à la somme des parties ou des éléments qui le composent. Ces éléments constituent d'abord une structure où chaque élément entretient une relation particulière avec les autres et remplit une fonction déterminée. Sur le plan de la forme qui se dégage de l'ensemble il y a

une cohérence, mais ce n'est pas cette cohérence qui importe, c'est la cohérence des fonctions qui est la plus importante.

Comprendre l'objet technique revient à comprendre cette unité et cette cohérence interne de l'objet.

Sur le plan de la compréhension de l'objet, Simondon nous fournit le moyen d'aborder l'objet technique par le concept.

Dans la description de l'objet technique qu'en donne Simondon, celui-ci apparaît comme un système unifié et cohérent à un moment de son développement, dans sa forme concrète. Lorsque cette unité et cette cohérence ont atteint un degré élevé, l'objet technique, en tant que système, se rapproche du système naturel. L'approche adoptée par Simondon permet de caractériser un objet technique par ses fondements. Cette approche permet, dans notre cas, de saisir l'identité de l'objet technique « canette auto-rafraîchissante » en tant que système technique, qui a une unité et une cohérence interne.

La compréhension par l'usage est une compréhension de nature pragmatique, elle est finalisée. Une compréhension pragmatique de l'objet n'est pas totalement débarrassée de la référence au réel où la sensibilité occupe une place importante. Or celle-ci est souvent trompeuse et n'est pas capable à elle seule de saisir certaines dimensions. La partie conceptuelle dans la compréhension pragmatique demeure emprunte de la finalité de l'action.

On peut distinguer dans les objets techniques ceux qui ont été conçus et réalisés sans théorie scientifique préalable. L'histoire de la technique abonde d'exemples d'inventions qui ont précédé la théorie. Il y a aussi des objets techniques inventés en conformité avec une théorie, mais qui auraient pu comme les premiers se passer de théorie, sauf lorsqu'il s'agit de les produire à l'échelle industrielle. Dans ce cas la théorie permet d'apporter le calcul et la précision pour reproduire l'objet à l'identique. Il existe un troisième type d'objets qui n'auraient jamais pu être inventés sans une théorie scientifique préalable. C'est le cas de l'ampoule d'électricité, du laser et aussi de notre canette auto-rafraîchissante. La compréhension valable de ce type d'objet ne peut se passer du recours à la théorie qui les fonde. Et c'est en cela que la compréhension du fonctionnement de la canette peut se concevoir comme une entrée dans la théorie thermodynamique qui la sous-tend.

La concrétisation de l'objet technique « canette auto-rafraîchissante » n'est pas le fait du hasard ou du tâtonnement comme c'est le cas d'un certain nombre d'objets techniques. Ses inventeurs ont exploité des connaissances scientifiques en thermodynamique. Mais la science à elle seule n'aurait pas suffi. Il fallait aussi de l'imagination.

La conception de la canette a rencontré de nombreux problèmes. Cette conception a évolué dans le temps.

Dans sa version initiale, la canette était dotée d'une valve qui n'était pas adaptée. Celle-ci va connaître des développements ultérieurs qui visent à optimiser l'utilisation de la quantité d'eau de l'échangeur. Un filtre va être adjoint à la valve pour récupérer les gouttelettes d'eau qui sont emportées par la dépression qui se produit. Tant qu'il y a de l'eau le processus de rafraîchissement se poursuit. Il s'arrête lorsqu'il n'y a plus d'eau dans l'échangeur. Plus il y a d'eau qui s'évapore, plus l'eau se rafraîchit. Le fait d'optimiser l'utilisation de cette eau accroît le rafraîchissement. On peut parler dans ce cas de conception continuée. On peut retracer tous ces développements de l'objet grâce aux brevets successifs déposés à l'INPI.

Deuxième problème : lorsque le système a été conçu, un problème purement thermodynamique s'est posé, celui relatif à une loi dans ce domaine : le principe de la conservation de l'énergie. Si l'énergie se conserve comment éliminer l'effet retour sur la boisson.

C'est là où l'analogie avec un autre objet technique, la cruche d'eau, entre en jeu. En effet, comment une cruche d'eau peut-elle rafraîchir l'eau et la maintenir fraîche ? L'analyse de la propriété de la matière dont est faite la cruche apporte la solution. Cette matière est l'argile. L'analyse de la structure de l'argile ne suffit pas. Il faut comprendre le phénomène permettant d'établir la fonction de l'argile. Ce phénomène est l'adsorption. Dans une cruche, l'argile, de part sa structure alvéolaire et sa propriété de capter l'humidité, constitue un adsorbant.

L'argile capte l'énergie d'un fluide, généralement l'eau dans le cas de la cruche en terre cuite. Le phénomène se réalise par capillarité. Ce qui a pour résultat la formation d'une fine pellicule d'eau à la surface d'une cruche par exemple. La chaleur extérieure assèche cette surface et la vaporise. Ce qui a pour effet le renouvellement de la pellicule d'eau qui rafraîchit l'eau.

Si l'argile par sa fonction d'adsorption peut capturer la chaleur d'un fluide, il peut aussi la stocker. Il faut donc trouver un corps qui a les mêmes propriétés que l'argile. Ce sont ces corps qu'on appelle des dessiccants. Certains ont une capacité d'adsorption plus forte que d'autres. Cette capacité est estimée en pourcentage par gramme de dessiccant. Les zéolites sont les dessiccants qui ont une capacité d'adsorption assez forte relativement à leur poids. Ces dessiccants peuvent stocker l'humidité et la chaleur qu'elle transporte. Ainsi l'énergie extraite de la boisson et transportée dans la vapeur d'eau, peut être stockée avec l'eau dans le dessiccant.

Un autre problème doit être résolu. Si la chaleur est stockée au niveau du dessicant, son accumulation à ce niveau peut provoquer des brûlures chez le consommateur. Les concepteurs ont doublé la paroi de la cavité du dessicant par une enveloppe adiabatique supprimant l'échange de chaleur avec l'extérieur.

Ce fragment d'explication permet de comprendre que l'objet technique final relève d'une genèse dans la conception de l'objet jusqu'à sa concrétisation finale. Et ce n'est qu'un état de l'objet technique dans son histoire.

Comme le souligne Simondon (1989), l'objet technique singulier et individué n'est qu'une étape dans son devenir dans son processus d'individuation.

7. Conclusion :

La construction du modèle épistémique de l'objet, dans cette situation particulière, se place dans un « entre-deux », dans lequel il y a référence à un noumène (Bachelard⁴³, 1998), à une théorie scientifique : théorie des changements de phase en thermodynamique, d'une part, et à un phénomène : l'objet technique canette, d'autre part. Dans le noumène, il y a une théorie des phénomènes qui est en jeu. Dans le phénomène c'est un objet singulier dont il est question et dont la compréhension du fonctionnement fait appel à ces théories. Cet « entre deux » est représenté par un modèle au sens où l'entend Martinand (1992).

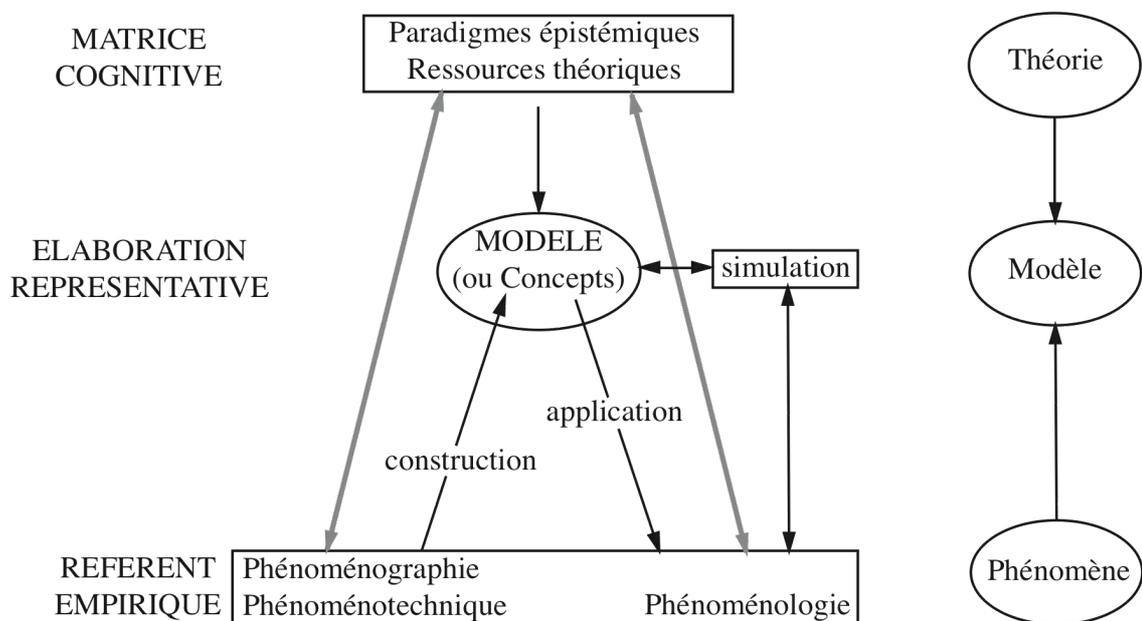


Figure 14. A gauche, schéma du Modèle selon Martinand (1992), à droite, schéma simplifié.

⁴³ - Cf. Bachelard (1998), Chap. VI, pp.109-110.

Pastré (2005), en référence à Martinand, fait la distinction dans un même modèle chez le sujet entre un modèle opératif (MO) et un modèle épistémique (ME)⁴⁴. Dans l'activité de conception le modèle épistémique prend le pas sur le modèle opératif.

L'approche de la compréhension du processus cognitif mis en jeu dans la construction de ce modèle épistémique de l'objet technique fait appel à ces deux niveaux. Cette construction n'est pas donnée, elle se réalise par étapes dans une situation particulière et ne se fait pas sans difficultés.

Notre analyse s'inscrit dans le cadre du constructivisme qui conçoit l'apprentissage en autonomie dans lequel l'action est un primat à la construction d'une connaissance.

Dans cette analyse nous ferons appel :

- au concept d'équilibration ;
- au concept de situation, notamment de situation didactique ;
- à la théorie des champs conceptuels et au principe sous-jacent selon lequel tout apprentissage porte sur un contenu spécifique, et tout concept construit tire sa source des situations où il est mis en jeu ;
- au concept de microgenèse définie comme une construction par étapes en situation,
- au concept de modèle épistémique ;
- au concept d'objet technique et de système technique dynamique ;
- et enfin au concept de misconception comprise comme un obstacle local lié à un contenu spécifique.

Hypothèse générale :

Nous faisons l'hypothèse générale d'une microgenèse de l'objet technique, d'une part, et de « misconceptions » (obstacle local), dans la microgenèse de l'objet technique, d'autre part.

⁴⁴ - Voir dans ce chapitre sur les genèses conceptuelles.

Chapitre 4.

Analyse et résultats

1. Introduction :

Cette étude porte sur l'apprentissage par problème (APP) chez deux groupes d'élèves d'ingénieurs d'une école du CESI, de première année, en formation par apprentissage.

Cet APP s'est déroulé en quatre séances de trois heures chacune suivie d'une séance de restitution d'une durée de 20 mn.

Les séances ont toutes été filmées en continu pour les deux groupes. Nous n'avons exploité que les verbalisations produites lors de ces cinq séances. Ces verbalisations ont été retranscrites intégralement. L'observable est donc constitué par les énoncés verbaux des élèves.

1.1. Quelques caractéristiques des élèves observés :

Le groupe 1 est composé de six élèves : cinq garçons (BN, DL, LD, MC et ML) et une fille (VA), le groupe 2 de cinq élèves: quatre garçons (DM, DST, FG et GN) et une fille (PA).

Ce sont des élèves sans expérience professionnelle issus de l'enseignement général. Ce qui ne signifie pas qu'ils sont dépourvus d'expérience dans la vie.

L'examen des dossiers des élèves ne nous a pas permis de retracer leurs parcours antérieurs avec précision ni de déterminer leurs niveaux dans le domaine de la thermodynamique et dans la conception de systèmes techniques thermodynamiques⁴⁵ à l'entrée dans cet apprentissage. Nous savons juste qu'ils ont reçu avant l'APP un cours leur présentant quelques concepts élémentaires en thermodynamique. L'analyse nous a permis de constater que ces concepts élémentaires ne sont pas maîtrisés par la plupart des élèves de ces deux groupes. Seuls quelques élèves semblent avoir révisé ce cours avant et/ ou maîtrisent quelques concepts élémentaires en thermodynamique. C'est le cas de BN pour le premier

45 - Nous avons suivi quelques élèves depuis leur entrée à l'école dans le cadre de la recherche sur la construction de la compétence par la formation en alternance de l'élève ingénieur du CESI. Il s'agit des élèves ML et VA du premier groupe, et des élèves DST, GN et PA du deuxième groupe. ML est en formation sur le terrain dans une entreprise d'usinage de pièces de système de production. Il exerce une activité de CAO de ces pièces en tant qu'apprenti. VA est en apprentissage de l'activité de mesure physique dans une centrale nucléaire visant à tester la fiabilité des matériaux des cuves. DST : est affecté à la surveillance et maintenance de système informatique de gestion robotisée de stockage de marchandise. GN : exerce l'activité d'assistant à la réalisation de projet immobilier chez Renault pour le compte de Renault. PA: participe en tant qu'apprenti au développement d'une technique d'analyse de la peau par rayonnement dans une entreprise de cosmétique (Johnson et Johnson).

groupe et DM pour le deuxième groupe. DL pour le premier groupe et GN pour le deuxième ont déclaré au début maîtriser le domaine de la thermodynamique, mais l'observation de leur activité a révélé beaucoup de lacunes chez eux dans ce domaine.

Dans la constitution des groupes, les élèves se sont regroupés par affinité. L'enseignante a procédé à une correction de manière à constituer des niveaux hétérogènes.

1.2. Constitution des données :

Les cinq séances ont été filmées en continu. Ce qui permet de faire une étude longitudinale de l'apprentissage au cours de ces séances.

Nous avons exploité uniquement les verbalisations des élèves produites lors des séances, les images vidéo n'ont pas été prises en compte. Ces verbalisations consistent en des énoncés de point de vue, de connaissances, de questions et de texte. A part les énoncés de texte, les autres énoncés constituent l'essentiel de l'observable permettant l'accès aux conceptions des élèves. Les énoncés de point de vue⁴⁶ constituent des jugements soit pragmatiques soit épistémiques. L'analyse porte sur le développement de ces deux catégories de jugements. L'objectif de l'analyse est de décrire ce développement

En termes de productions verbales, certains élèves ont produit plus d'énoncés que d'autres.

1.3. Rappel de la tâche à réaliser :

Dans cet apprentissage par problème, les élèves sont confrontés à une situation totalement nouvelle pour eux. Cette situation est représentée par un système auto réfrigérant qui fonctionne sans apport extérieur d'énergie (cf. Chapitre 2, la tâche).

Dans la prescription, les élèves doivent apprendre en groupe en suivant les étapes indiquées dans le guide de l'étudiant d'APP. Ils doivent au préalable nommer un animateur, un secrétaire et un script. L'animateur a pour rôle de faire participer tous les membres du groupe. Le script note les points importants à discuter au tableau ou sur un paper-board au fur et à mesure. Le secrétaire note la synthèse des discussions en groupe et les élaborations réalisées au cours d'une séance.

Dans la prescription, la tâche à réaliser consiste à expliquer le fonctionnement de ce système et préciser comment il rafraichit une boisson. L'explication du fonctionnement du système doit mettre en œuvre un certain nombre de concepts en thermodynamique que les élèves doivent acquérir lors de cet apprentissage. Comme nous l'avons noté ci-dessus, les

46 Les énoncés sont constitués essentiellement de jugement pragmatique ou épistémique. Les jugements pragmatiques concernent la conception de l'objet technique, les jugements épistémiques concernent les concepts, notamment scientifiques.

élèves ne disposent pas de tous les concepts en thermodynamique nécessaires à l'explication du fonctionnement de ce système. Ils sont supposés les acquérir au cours de cet apprentissage.

Deux remarques à propos de la tâche à réaliser :

Première remarque :

L'article qui présente la canette donne un schéma de celle-ci dans sa position inversée de fonctionnement. Les élèves ont supposé qu'elle fonctionne dans cette position. Cette idée est renforcée par certains termes employés dans le texte de l'article : « les calories sont transférées au fond de la canette » (cf. article). Ces informations vont avoir un effet sur les élaborations qu'ils vont effectuer.

Deuxième remarque : une tâche au but floue

La prescription est ambiguë, le but n'est pas clair. On peut distinguer deux buts dans une même tâche : 1/ l'explication du processus de rafraîchissement de la boisson ; 2/ l'acquisition des concepts scientifiques en thermodynamique mis en jeu dans cette explication, notamment les concepts de changement de phase et de transfert thermique. Le premier but renvoie à l'activité de l'ingénieur qui conçoit et invente des objets techniques, le second à l'activité de l'élève qui apprend des notions et des concepts en thermodynamique.

Pour l'enseignante, ces deux buts sont supposés se réaliser simultanément dans la même activité qui doit se dérouler selon l'ordre donné dans le guide de l'étudiant d'APP.

Les moyens matériels pour réaliser la tâche :

Chaque groupe dispose d'une salle avec tout le nécessaire pour écrire (papier, crayons, marqueurs, paper-board et tableau).

Comme source d'informations, les élèves disposent de l'article de la revue spécialisée qui présente sommairement l'objet technique, de dictionnaires usuels et du guide de l'étudiant en APP et de trois sites sur internet.

À partir de la deuxième moitié de la deuxième séance, ils ont accès à trois sources d'informations qui sont des sites Internet : Le site des Sciences et techniques de l'ingénieur⁴⁷ Le site de la société Thermagen⁴⁸ et celui de l'INPI⁴⁹.

47 Ce site est payant. Les écoles du CESI s'y abonnent.

48 C'est la société qui a inventé la canette auto-rafraîchissante

49 Institut National de la Protection de la Propriété Industrielle.

Sur le site des « sciences et techniques de l'ingénieur », ils ont accès aux informations théoriques sous forme de cours complet sur un domaine particulier.

Sur les sites de Thermagen et de l'I.N.P.I., ils ont accès aux brevets successifs déposés sur la canette. Aucun brevet ne donne une explication complète de son fonctionnement. La succession des brevets témoigne d'une conception continuée de la canette auto rafraîchissante. Chaque brevet insiste sur un aspect de l'objet technique (L'échangeur thermique, le dessicant, la valve) ou sur une amélioration apportée. Le guide ne donne pas d'ordre dans la consultation de ces sources d'informations.

Au cours de la première séance, les élèves doivent prendre connaissance du problème par la lecture d'une revue spécialisée qui présente sommairement l'objet technique et son fonctionnement. Ils doivent ensuite définir les mots qui leur semblent nouveaux ou dont la signification leur semble imprécise ou douteuse. Durant la première séance, ils n'ont pas accès aux trois sites Internet prescrits. Ils disposent uniquement de dictionnaires usuels et n'ont pas le droit d'utiliser les ressources d'Internet. Ils doivent d'abord cerner le problème, comprendre de quoi il s'agit et spécifier des pistes de recherches et de documentation. A partir de la deuxième séance, ils sont autorisés à consulter la documentation sur les trois sites prescrits.

Organisation des groupes :

GROUPE 1 :

Composition : six élèves

BN : animateur du groupe

ML : secrétaire

MC : scribe

GROUPE 2 :

Composition : cinq élèves

FG : animateur proclamé, remplacé au cours de l'APP par PA

GN : secrétaire

DST : scribe

L'observation globale de l'activité des deux groupes fait apparaître que les deux groupes n'ont pas fonctionné de la même manière

2. Description du fonctionnement global des deux groupes

L'activité des élèves alterne des moments de travail individuel et des moments de travail en groupe. Dans les premiers moments, les élèves collectent des informations, les

interprètent et élaborent des hypothèses. Dans les seconds, ils confrontent leurs points de vue. Ce deuxième moment est à rapprocher de ce qu'on appelle le débat scientifique.

2.1. Fonctionnement global du groupe 1 :

Travail effectivement collectif :

À l'exception d'un seul élève (DL), les autres élèves ont traité ensemble les mêmes questions au même moment sous la direction de l'élève désigné comme animateur C'est un groupe organisé

A part quelques moments chauds où les discussions s'enflamment et où on ne respecte plus le tour de parole, dans l'ensemble, tous les élèves ont pu émettre leur avis, chacun d'eux a été écouté, et chaque avis a été discuté L'animateur a bien régulé le groupe

Il reformule souvent ce qui a été discuté, pour vérifier la signification de ce qui a été élaboré collectivement

C'est l'animateur qui présente l'état de leur avancement à l'enseignante, au nom du groupe et non en son nom propre

Lorsqu'il oublie un détail, un élève complète sa présentation (c'est dans les présentations de l'animateur que l'on peut saisir les élaborations du groupe, leurs raisonnements et leurs conceptions)

Nous retenons dans ce groupe BN et DL parce qu'ils ont proposé le modèle d'une situation connue qui a orienté l'apprentissage. BN s'est révélé un bon animateur. C'est aussi celui qui a produit le plus d'énoncés.

Fréquences des interventions de chaque élève dans le groupe 1 :

BN : 1623 (34.70 %)

MC : 905 (19.35 %)

ML : 734 (15.69 %)

DL : 669 (14.30 %)

VA : 396 (8.47 %)

LD : 350 (7.84 %)

Total : 4677 (100 %)

Moyenne 16,67 %

C'est un groupe relativement autonome qui a cherché à construire le problème par ses propres moyens sans solliciter l'enseignante pour des explications. Ils se contentent de lui présenter l'état de leurs avancements quand elle le leur demande.

Ce groupe a travaillé sur la conception de l'objet technique jusqu'à la première moitié de la 3^e séance

La canette se présente pour eux comme un mystère qui a stimulé leur curiosité qu'ils se sont efforcés d'élucider.

L'analogie du réfrigérateur (situation connue) a été utilisée spontanément comme connaissance de départ pour aborder la canette (la situation nouvelle)

On peut suivre la genèse de l'objet technique pas à pas dans ce groupe

Tous les phénomènes en jeu dans la canette ont été traités. Certains ont posé plus de problèmes que d'autres (par exemple : comprendre d'où vient la dépression et comment elle participe au maintien de l'évaporation durant 5mn)

Lors de la présentation de l'explication du fonctionnement de la canette à la 3^e séance où ils semblaient avoir réussi avec une combinaison des différents raisonnements mobilisés et avec des conceptions pratiquement abouties, l'enseignante leur demande d'approfondir encore. Par approfondissement, elle visait l'acquisition de la théorie des changements de phase. Or, pour eux, le seul changement de phase intéressant pour leur permettre de comprendre la canette, c'est la vaporisation. Celle-ci n'est qu'un cas particulier parmi les six changements de phase possibles.

Ils manifestent une certaine déception suite à la réaction de l'enseignante

À partir de la 2^e moitié de la troisième séance, ils changent de but et basculent dans une activité purement scolaire (apprendre des concepts).

2.2. Fonctionnement global du groupe 2 :

Travail en apparence collectif :

Chacun poursuit son idée personnelle. Les élèves ne s'écoutent pas et ne tiennent pas compte de l'avis des autres. De ce fait, certains avis intéressants exprimés par certains élèves, qui auraient pu faire avancer le groupe, n'ont pas été pris en considération.

Les élèves n'ont pas confiance dans leurs propres conceptions ni dans celles des autres.

C'est un groupe désorganisé. Les élèves sont désynchronisés. Ils ne sont pas centrés au même moment sur la même question. Une seule question les a réunis : le rôle que joue le dessicant en tant que pompe à vapeur.

Nous retenons PA et DM qui ont produit le plus d'énoncés et ont imprimé leur façon de faire au reste du groupe.

FG s'est désigné au départ comme animateur. Il se révèle inefficace dans cette fonction. PA va prendre le relai et s'impose comme animatrice. Elle a influencé le déroulement de l'apprentissage du groupe.

Fréquences des interventions de chaque élève dans le groupe 2 :

PA : 1340 (28.94 %)

DM : 1071 (23.13 %)

DST : 819 (17.69 %)

GN : 707 (15.27 %)

FG : 693 (14.97 %)

Total : 4630 (100 %)

Moyenne 20 %

Ces élèves n'avaient pas de modèle analogique qui aurait pu servir de solution connue au départ leur permettant d'aborder la canette. Ils ont plus travaillé sur les concepts que sur la conception de l'objet. Ils se sont noyés dans les définitions des concepts.

Ils ont passé beaucoup de temps sur la compréhension des termes et notions utilisés dans l'article qui leur présentait la canette. Leurs énoncés sont pour la plupart des citations de texte.

Ils ne sont pas très autonomes. Ils sont dépendants de l'enseignante qu'ils sollicitent souvent.

Lors de l'interaction avec l'enseignante, celle-ci a déployé beaucoup de moyens sans résultat pour les amener à élaborer une hypothèse sur le fonctionnement de la canette.

Ils ont tendance à donner des fragments de réponses non coordonnés, le plus souvent hors sujet, où chaque réponse donnée par un élève n'est pas liée à celle d'un autre. Le plus souvent l'interaction avec l'enseignante prend l'allure de question réponse où les réponses des élèves sont courtes, comme c'est le cas dans une classe lors d'un cours fonctionnant sur le mode traditionnel.

Ces élèves ont travaillé plutôt sur des concepts que sur la conception de l'objet technique, parce qu'à chaque fois qu'ils tentaient d'expliquer la canette ils butaient sur la signification des mots utilisés et partaient sur la définition des mots.

Lorsqu'ils ont eu accès à la documentation scientifique et technique, ils se sont employés à l'étudier, à faire des synthèses et de la compilation. Pour l'explication de la canette, ils ont eu recours aux explications de l'enseignante qui leur a soufflé la plupart des réponses. Ils ont demandé aussi de l'aide à l'autre groupe.

Ils ont pu présenter un travail similaire aux autres groupes. Ces élèves ont appris le cours. Ils étaient plutôt sur une tâche scolaire.

L'enseignante :

Elle passe régulièrement dans les groupes, trois à quatre fois par séances. Les élèves lui rendent compte de l'état d'avancement de leur travail. Elle pose des questions, identifie les erreurs, les discutent et énonce parfois des concepts généraux. En d'autres termes, l'enseignante interfère dans l'espace a-didactique des élèves.

Ces deux manières de fonctionner correspondent à deux formes d'apprentissage :
apprentissage par le texte et apprentissage par les situations

Les hypothèses :

Hypothèse générale :

Il y a deux manières d'apprendre : par les situations, et par le texte

Hypothèse 1 :

L'apprentissage par les situations vise un but pragmatique. Celui-ci se réalise dans la réussite de l'action. Il se concrétise par la construction d'un modèle opératif. Il s'agit ici de la construction du modèle opératif de fonctionnement de la canette.

L'apprentissage par le texte vise un but épistémique. Celui-ci se réalise par la construction de concepts issus d'un savoir socialement reconnu. Il s'agit ici d'un savoir savant propre à un domaine en physique : des concepts en thermodynamique, notamment les concepts de changement de phase et de transfert thermique.

Hypothèse 2 :

L'apprentissage par les situations s'effectue en deux temps chronologiques distincts
l'un de l'autre :

– Un premier temps au cours duquel l'apprenant est confronté à une situation-problème et agit sur la situation pour résoudre le problème qu'elle supporte. Ce temps s'achève lorsque l'apprenant a réussi son action, et a résolu le problème. L'espace dans lequel opère l'apprentissage est un espace a-didactique, un espace où l'apprenant lutte par ses propres moyens pour résoudre le problème sans l'aide de personne ; c'est un temps qui correspond à une forme de conceptualisation dans l'action ;

– Un deuxième temps qui suit le premier, au cours duquel la réussite est reprise par le sujet pour la transformer en une connaissance prédicative. Il la formule dans un langage qui lui est propre et s'efforce de la rendre intelligible pour autrui. Par cette formulation, il devient capable de tenir un discours sur sa propre réussite. À partir des éléments pertinents de cette connaissance acquise dans l'action, il peut, par une généralisation l'étendre à d'autres situations appartenant à la même classe. Cette phase correspond à une seconde conceptualisation différente de la première. Un médiateur social (un tuteur, un enseignant, un expert, etc.) peut l'aider à acquérir un concept général (un concept scientifique par exemple) en partant de son acquis lors de cette seconde conceptualisation. Lorsqu'il s'agit d'un concept scientifique c'est l'enseignant qui le lui apporte et qui l'aide à l'acquérir par une validation de l'acquis, une formulation et une institutionnalisation du savoir.

Hypothèse 3 :

L'apprentissage par le texte consiste à acquérir le concept général en identifiant les propriétés et les relations qui le constituent. La situation sert dans ce cas pour exemplifier le concept. On construit un concept général à la fois. La construction des concepts généraux ne permet pas de concevoir un objet technique complexe. Celle-ci ne se réduit pas à une simple application d'une théorie.

Il faut d'abord passer par un processus de pragmatisation des concepts, c'est-à-dire un processus au cours duquel ils sont transformés en des concepts outils. Cette opération peut se réaliser dans une action sur la situation, et nécessite un temps relativement long.

Hypothèse 4 :

Ces deux apprentissages supposent l'existence d'obstacles : des obstacles à la conception de l'objet et des obstacles à la construction des concepts. Ce sont des obstacles locaux dans un domaine précis. Ce sont donc des misconceptions.

4. Méthodologie :

Le dispositif d'APP place les élèves dans une situation de débat scientifique à propos du fonctionnement du système technique de la canette.

L'observable est constitué par des énoncés produits par les élèves lors de ce débat.

Dans le traitement du corpus, ces énoncés sont codés de la manière suivante : « G1S10001 ».

G1 ou G2 pour distinguer les groupes ;

S1, S2, S3 et S4 pour les séances ;

0001 pour l'ordre de l'énoncé.

Dans la présentation de l'analyse, ces codes permettent au lecteur d'identifier les énoncés, dans les annexes 1 et 2.

Les énoncés produits par les élèves sont pour la plupart des jugements. Un jugement exprime une conception. Le jugement lui-même n'est pas la conception puisque celle-ci est inobservable. Les conceptions sont inférées à partir des jugements exprimés par les élèves. Dans les jugements nous distinguerons les « jugements pragmatiques » et les « jugements épistémiques ». Les jugements pragmatiques⁵⁰ ont un rapport avec l'action (ou les opérations au sens de Piaget) effectuée en situation sur la situation (Pastré, 2011). Les jugements épistémiques portent sur les concepts.

Les analyses, de la genèse de l'objet technique et celle des concepts, consistent à suivre ces jugements à travers les énoncés produits par les élèves. La genèse est initiée par le processus suivant :

- Une connaissance est mobilisée, elle est exprimée dans un jugement ;
- Il s'ensuit une attente, suivie d'une réponse de la situation ;
- La réponse de la situation s'exprime, éventuellement, par une contradiction ;
- La contradiction déclenche la genèse.

⁵⁰ - Pastré substitue « jugement pragmatique » au « théorème en acte » de Vergnaud. Il estime que « Le terme 'théorème' me paraît discutable, dans la mesure où, dans son acception mathématique, il désigne une proposition démontrée. Mais l'idée de propositions tenues pour vraies est une idée très intéressante. » Comme toute proposition est un énoncé qui correspond à un jugement, Pastré retient le terme de 'jugement pragmatique'. Il ajoute qu'« A la différence d'un concept, qui n'est ni vrai ni faux, mais qui se révèle pertinent ou non pertinent pour une situation donnée, un jugement est doté de la propriété de vériconditionnalité : il affirme ou il nie quelque chose, même de façon implicite. Un jugement peut correspondre à un énoncé de circonstance, à un énoncé factuel. Mais il peut aussi correspondre à un énoncé général qui fonde et justifie les énoncés de circonstances et les énoncés factuels. De même qu'un concept pragmatique permet d'englober dans une même représentation un ensemble d'occurrences singulières et circonstancielles, de même un jugement pragmatique représente un énoncé tenu pour vrai qui permet de subsumer en les justifiant toute une série d'énoncés de circonstance. » (Pastré, 2011, p.191).

Cette genèse est analysée selon la grille de l'équilibration : assimilation, accommodation.

L'analyse vise à identifier, à partir des énoncés produits, les contradictions, d'une part, et les transformations des élaborations des élèves, d'autre part. L'attention est portée sur les jugements.

Le suivi de l'évolution de ces jugements en identifiant les contradictions et les transformations permet de retracer la genèse.

Il y a plusieurs catégories de contradictions : celles qui apparaissent dans la conception de l'objet et celles qui sont dans la construction des concepts.

On distingue aussi celles que le sujet lui-même relève lorsque son outil de pensée se révèle inadapté à la situation. Dans ce cas, la contradiction renvoie à un conflit cognitif au niveau interne. Il y a aussi la contradiction entre le point de vue d'un élève et celui d'un collègue ou de l'enseignante. Dans ce cas, il s'agit d'un conflit socio-cognitif.

Enfin, il y a les contradictions que relève l'analyste. Elles sont de deux sortes : les contradictions qui apparaissent dans la conception de l'objet technique et qui sont identifiées par une mise en rapport du jugement émis par l'élève avec la structure conceptuelle attendue ; et celles qui apparaissent dans la construction des concepts et qui sont identifiées par une mise en rapport des conceptions de l'élève avec le concept visé.

La construction des itinéraires fait appel à la méthode de l'intrigue, telle que Pastré (1992) l'a utilisée, en s'inspirant de Ricœur (1983, 1990), dans l'analyse de l'activité des ingénieurs des centrales nucléaires. Dans sa théorie du récit, Ricœur propose deux concepts pour aborder l'identité narrative : la *mêmeté* et l'*ipséité*. Le premier désigne l'expérience que construit un sujet au cours de son existence, qu'il le veuille ou non. C'est une expérience accumulée tout au long de la vie, à laquelle il n'a pas accès. Le second désigne le processus d'appropriation, par le sujet lui-même, de sa propre expérience. Cette appropriation se réalise dans un récit, au cours duquel il reconstruit son expérience. Lors de cette reconstruction, il construit des épisodes qui s'enchaînent et s'efforce de donner une cohérence à l'ensemble. La mise en intrigue consiste à construire, par le sujet lui-même, ces épisodes pour donner du sens à ce qu'il a vécu. C'est le moyen par lequel un sujet passe de l'*idem* à l'*ipsé*. Pastré a exploité ce moyen comme méthode dans l'analyse par le sujet, de sa propre activité, lors d'un débriefing par exemple. Nous distinguerons deux types de mise en intrigue : celle que réalise le sujet lui-même et celle que fait l'analyste. La première est appliquée au compte rendu, de l'élève, à ses collègues ou à l'enseignante, à travers une série d'énoncés qui sont généralement proches. Dans cette mise en intrigue, l'élève s'efforce d'ordonner les états et les événements (ou transformations) qui ont lieu dans la canette et de les enchaîner dans un

« récit ». La seconde est celle que nous appliquons aux énoncés, proches ou distants, d'un élève pour construire son itinéraire, mettre en évidence sa genèse de l'objet technique ou d'un concept.

5. Analyse du groupe 1 : L'apprentissage d'une situation nouvelle par analogie à une situation connue

Dans ce groupe, l'apprentissage se fait par une situation connue. Deux élèves dans ce groupe proposent à leurs collègues cette situation comme moyen pour aborder la situation nouvelle (G1S10219 à G1S10280).

Une situation connue se présente chez le sujet sous la forme d'un modèle opératif (MO). C'est un modèle d'une situation singulière qui se distingue du modèle opératif chez un sujet expérimenté dans un domaine. Le modèle de celui-ci inclut une classe de situation. Du fait que le modèle ne s'appuie que sur une seule situation connue singulière, on a tendance à l'assimiler à celle-ci. Autrement dit, on opère à partir des éléments qui composent cette situation connue et non à partir des invariants propres à une classe de situation. Lorsqu'un modèle opératif s'appuie exclusivement sur une situation singulière celle-ci a tendance à fonctionner comme une situation prototypique sans s'y confondre. Une situation prototypique comporte une collection d'éléments que l'on retrouve chez les individus appartenant à la même catégorie mais qui ne correspondent pas nécessairement aux invariants qui définissent cette catégorie⁵¹. C'est en cela que la situation connue a tendance à fonctionner « comme » une situation prototypique et non pas en tant que telle.

Nous rappelons qu'un modèle opératif correspond à une structure conceptuelle personnelle de la situation chez le sujet.

Le modèle de situation que les deux élèves mobilisent dans cet apprentissage est celui du fonctionnement du système de réfrigération du réfrigérateur. Pour cette même situation, les deux élèves ont deux modèles opératifs différents.

Pour aborder la situation nouvelle l'activation et la mobilisation de ce modèle se fondent sur les similitudes existantes entre la situation connue (ou source) et la situation nouvelle à apprendre (ou cible). Dans l'utilisation d'une situation connue pour apprendre une nouvelle, l'analogie est globale et se distingue de l'analogie partielle. La première porte sur

51 - Par exemple, le moineau constitue le prototype de la classe oiseau parce qu'il dispose d'une collection d'éléments (un bec, des ailes, des pattes avec griffes, des plumes et il vole) que l'on ne retrouve pas tous nécessairement chez les autres oiseaux. L'autruche n'a pas toutes les caractéristiques du moineau, elle ne vole pas.

l'ensemble de la situation, la seconde sur un seul aspect isolé de la situation. Dans le cas présent, l'analogie est fondée sur une similitude entre la situation connue globale et la situation nouvelle globale et non sur une partie uniquement de l'ensemble. Cette analogie peut porter sur les traits de surface ou sur les traits de structure.

Nous avons noté dans cet apprentissage que la référence à cette situation connue est plus fréquente à la première séance. Elle est évoquée dans trente-trois énoncés, dont vingt-quatre sont consacrés à l'évocation et la présentation du modèle du système du réfrigérateur⁵². Lors de cette première séance, la situation connue a permis de construire un modèle de la situation nouvelle dans ses grandes lignes. Elle constitue un instrument cognitif pour aborder une situation nouvelle. Dans la conception d'un objet technique, un tel instrument est très précieux. Il offre le moyen d'opérer sur la situation nouvelle : la lire, la décoder et l'interpréter, même si au départ elle n'est pas complètement adaptée à la situation nouvelle.

Cette situation n'est évoquée que quatre fois à la deuxième séance⁵³, une seule fois à la troisième séance⁵⁴ et disparaît à la quatrième séance. L'apport d'informations de plus en plus précises au cours des différentes séances a permis de préciser et de consolider ce modèle de la situation nouvelle. À la quatrième séance, le modèle initial de la situation connue s'est complètement transformé pour donner naissance à un modèle nouveau adapté à la situation nouvelle. On constate donc qu'au fur et à mesure que la situation nouvelle se construit, le recours à ce modèle initial tend à disparaître. Plus la maîtrise de la situation s'accroît, moins l'élève a besoin de son modèle initial. Par ailleurs, celui-ci n'est pas resté le même qu'avant, il s'est transformé. En effet, au bout du parcours, ce modèle a évolué vers un modèle nouveau dont les invariants opératoires s'appliquent de manière adaptée aux deux situations. Ainsi, d'une situation singulière on aboutit à la construction d'un embryon de classe de situation qui compose un nouveau modèle, avec tous les effets que cela implique sur l'organisation du modèle initial dont il est issu. Celui-ci s'est réorganisé et reconfiguré progressivement pour englober les deux situations : l'ancienne et la nouvelle.

La construction du modèle opératif de l'objet technique s'est réalisée le long d'une longue genèse. Dans cette genèse, il y a eu des errances, des impasses, des retours en arrière, des incohérences qui témoignent des difficultés que l'on peut rencontrer dans la conception

52 - (G1S10085 - G1S10099 - G1S10101 - G1S10219 - G1S10221 - G1S10223 - G1S10226 - G1S10229 - G1S10231 - G1S10233 - G1S10237 - G1S10239 - G1S10241 - G1S10243 - G1S10245 - G1S10247 - G1S10250 - G1S10252 - G1S10254 - G1S10257 - G1S10259 - G1S10263 - G1S10265 - G1S10269 - G1S10271 - G1S10274 - G1S10276 - G1S10280 - G1S10931 - G1S10992 - G1S11001 - G1S11046 - G1S11111)

53 - (G1S20114 - G1S20160 - G1S20202 - G1S20271)

54 - (G1S30400)

ou la reconception d'un objet technique. Nous n'allons pas reprendre cette genèse dans le détail. On peut la présenter par des étapes qui correspondent à des constructions qui vont dans le sens de la conception de l'objet. La mise en intrigue donne à ces étapes l'allure d'épisodes cohérents qui rendent cette genèse intelligible au lecteur. C'est une construction qui ne correspond pas au cheminement réel chez l'élève.

Le choix des deux élèves BN et DL se justifie par le fait qu'ils disposent tous les deux d'une même situation connue pour aborder la situation nouvelle.

Au départ, ces élèves commencent par une reconstitution à deux de cette situation connue. C'est au cours de cette reconstitution que l'on peut relever la différence entre leurs deux modèles de cette même situation connue. Ce fait a déjà été constaté dans plusieurs observations en ergonomie cognitive et en didactique professionnelle : une même situation peut donner lieu, chez deux sujets différents, à deux modèles opératifs différents⁵⁵.

Chacun va mobiliser son modèle personnel pour aborder la situation nouvelle. La disposition d'une situation connue va orienter l'apprentissage vers la construction de la situation nouvelle car, comme nous l'avons précisé plus haut, le MO construit de la situation connue concerne celle-ci dans sa globalité, et opère sur la situation nouvelle dans sa totalité et non pas uniquement sur un de ses aspects. Du fait que les deux modèles des deux élèves sont différents, l'apprentissage de la situation nouvelle ne sera pas le même. Autrement dit, la construction de la situation nouvelle chez les deux élèves ne va pas suivre le même chemin.

5.1. L'évocation du modèle analogique d'une situation connue chez BN :

Pour BN, le rafraichissement par le système du réfrigérateur se fait grâce à un échange thermique qui extrait de la chaleur à la cabine intérieure et l'évacue à l'extérieur dans l'environnement de l'appareil. Ce transfert thermique de l'intérieur du réfrigérateur vers l'extérieur s'effectue par des échanges selon deux modes différents : la conduction et la convection. L'échange par conduction est un échange direct entre le milieu de la cabine et le fluide frigorigène qui passe par l'évaporateur de l'échangeur thermique du réfrigérateur. Lors de cet échange direct, le milieu de la cabine cède sa chaleur au fluide frigorigène. Celui-ci s'évapore à basse température et la vapeur obtenue transporte l'énergie thermique dans le circuit de l'échangeur thermique et la cède après au milieu extérieur. C'est le principe de

55 - Nous avons cité dans notre problématique le cas observé par D. Camuso chez deux experts qui ont deux représentations fonctionnelles différentes d'un même système technique, qui déterminent deux stratégies différentes.

l'échange par convection. C'est ainsi que selon ce processus, la chaleur de la cabine intérieure est extraite et évacuée à l'extérieur.

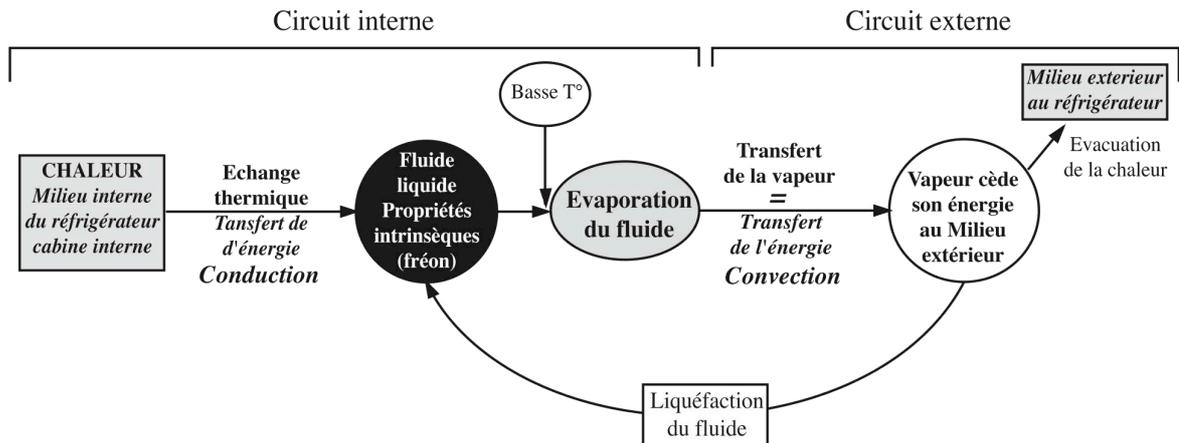


Figure 15. Modèle opératif du réfrigérateur chez BN

5.2. Conception de l'objet technique chez BN :

On peut résumer en gros la genèse de l'objet technique chez BN à huit grandes étapes non nécessairement chronologiques :

5.2.1. Conception initiale de l'évaporation dans la canette :

5.2.1.1. Mobilisation du modèle initial du réfrigérateur

L'apprentissage chez BN de la situation nouvelle par cette situation connue passe par l'identification d'une similitude globale entre les deux situations. La similitude globale porte sur le transfert thermique d'un milieu A vers un milieu B selon un processus global identique dans ses grandes lignes. Ce sont celles-ci qui sont rappelées à maintes reprises appuyées souvent par l'expression : « comme dans le frigo ». Cette similitude ne porte pas sur un seul phénomène isolé en jeu dans le processus global de la réfrigération. On note que le milieu A cède de l'énergie thermique à un fluide frigorigène qui s'évapore à basse température. La vapeur produite sert de véhicule à l'énergie extraite. Elle la transporte pour l'évacuer dans le milieu B.

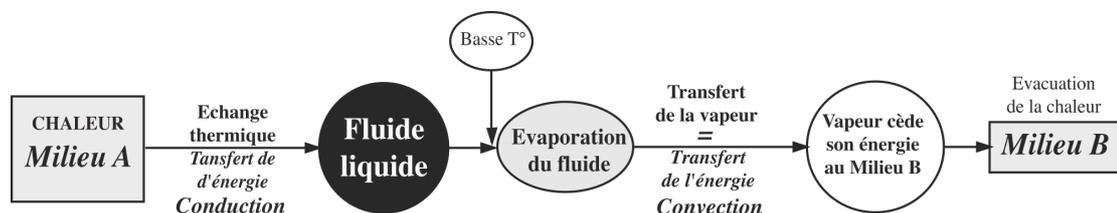


Figure 16. Les similitudes retenues par BN dans le fonctionnement des deux systèmes considérés

Ce sont les grands traits de similitude entre les deux systèmes. La chaleur est transmise par conduction d'un milieu A à un fluide frigorigène qui s'évapore à basse température. Le fluide, à l'état de vapeur, joue le rôle de véhicule à l'énergie thermique pour la transférer par convection au milieu B. Par ce processus, l'énergie est transférée du milieu A vers le milieu B. C'est ce principe de base qui fonde cette analogie chez BN. Tout le long de son apprentissage de la situation nouvelle, BN ne va pas perdre de vue ce principe de base. Il le rappellera chaque fois qu'il évoque le modèle du réfrigérateur.

5.2.1.1.1. L'assimilation de l'évaporation dans la situation nouvelle à celle dans la situation connue

Pour BN, le système de la canette, comme celui du réfrigérateur, dispose d'un milieu A qui est la boisson que l'on souhaite rafraîchir. Cette boisson cède de l'énergie thermique à un fluide qui est l'eau liquide. Ce fluide s'évapore à basse température. La vapeur d'eau produite transporte l'énergie produite dans un milieu B qui est le dessiccant.

[...] Le liquide (la boisson) est plus chaud que ton eau. Il vaporise l'eau. En se vaporisant, l'eau va prendre la chaleur du liquide (la boisson) (GIS10414) [...] La vapeur d'eau produite va être récupérée en dessous. Elle va être adsorbée. Ce qui fait que la chaleur qui était auparavant dans la boisson va se retrouver dans l'eau qui va être vaporisée et la vapeur d'eau va se retrouver à l'étage inférieur, comme ça la chaleur qui était dans l'enceinte supérieure est évacuée. (GIS10416)

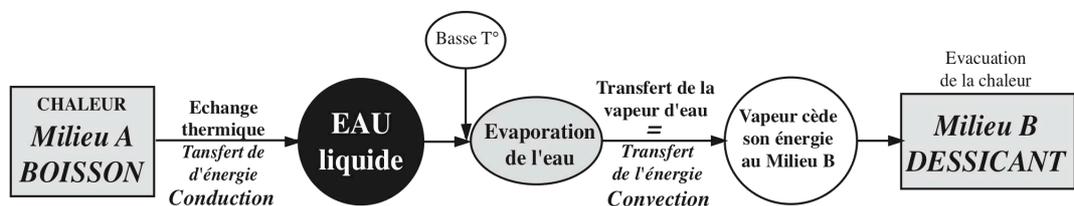


Figure 17. Première représentation chez BN du fonctionnement de la canette issue de l'analogie du réfrigérateur

C'est le premier modèle transitoire du système de la canette qu'il élabore et qui est un modèle global et général qu'il va approfondir le long des séances.

L'identification des grands traits de similitude entre les deux situations met en place le processus d'apprentissage d'une situation nouvelle par une situation connue.

L'analogie entre le réfrigérateur et la canette auto-rafraîchissante repose principalement sur le mode de transfert thermique par évaporation qui est un transfert par convection. C'est avec ce modèle qu'il va aborder l'apprentissage de la situation nouvelle. Ce modèle guidera son apprentissage de la situation nouvelle. Cet apprentissage se fera par étapes, et la construction du modèle de la canette se fera selon une genèse progressive, mais non linéaire et ordonnée.

5.2.1.1.2. L'accommodation du modèle mobilisé à la nouvelle situation : la mise sous vide de l'eau change les caractéristique de l'eau pour lui permettre de s'évaporer à basse température

L'assimilation du fonctionnement de la canette au modèle de fonctionnement du réfrigérateur va immédiatement atteindre ses limites. Car les deux systèmes sont différents du point de vue de leur géométrie, de leur fonctionnement et des phénomènes en jeu.

Le premier phénomène dans la situation nouvelle qui va résister à cette assimilation est l'évaporation du fluide frigorigène utilisé dans la canette à basse température.

Dans le modèle de BN, l'évaporation à basse température dans l'évaporateur de l'échangeur thermique du réfrigérateur se réalise grâce aux propriétés intrinsèques du fluide frigorigène utilisé dans le réfrigérateur. Pour que cette évaporation ait lieu à basse température, il faut deux conditions : un apport de chaleur et un fluide frigorigène technique spécial qui a la capacité, par ses propriétés intrinsèques, de s'évaporer à basse température lorsqu'on lui apporte de la chaleur. (G1S10221 à G1S10227). L'assimilation porte d'abord sur le liquide frigorigène.

BN teste l'évaporation de l'eau dans l'échangeur thermique du réfrigérateur. Il considère que l'eau n'a pas les mêmes caractéristiques que le fréon. Elle ne s'évapore qu'à 100 °. Il estime que si on remplace le fréon par de l'eau, celle-ci ne pourra s'évaporer qu'à 100°. (G1S10227)

La situation lui répond : l'eau s'évapore bel et bien à basse température dans la canette et rafraîchit la boisson. Ce système de réfrigération par évaporation de l'eau à basse température a été testé et éprouvé et fonctionne très bien.

Sa conception de l'évaporation de l'eau est en contradiction avec la situation nouvelle.

La confrontation à cette situation nouvelle remet en question son modèle du réfrigérateur. Cette première contradiction marque le début de la genèse du modèle de l'objet technique.

Face à cette contradiction, le modèle mobilisé est remis en question. Il s'avère inadapté au système de la canette. Ce qui introduit une perturbation s'exprimant au niveau cognitif par un conflit interne entre la connaissance disponible et la réponse de la situation nouvelle. L'échec de l'assimilation fait basculer le processus cognitif dans l'accommodation. La connaissance mobilisée s'ouvre à un changement possible, à une adaptation à la situation nouvelle. Cette perturbation génère une question : comment l'eau peut s'évaporer à basse température dans la canette ?

Au cours de cette phase de l'apprentissage BN procède à une première transformation de la conception initiale de l'évaporation. Il conçoit que l'évaporation s'effectue par la mise sous vide de l'eau.

Pour que cette transformation de la connaissance disponible se réalise, il faut une information nouvelle pertinente. La seule source d'informations dont dispose BN, à cet instant, sur la situation nouvelle est le texte de l'article.

Sa première lecture de l'article est orientée par le modèle initial dans une perspective d'assimilation du système de la canette à celui du réfrigérateur tel qu'il le conçoit à ce moment. Il aborde la nouvelle lecture de l'article avec un modèle initial remis en question. L'examen des données de l'article sur la situation est orienté par cette perturbation et la question à laquelle elle aboutit. Il note une information à laquelle il n'a pas prêté attention lors de la première lecture de l'article. L'information qu'il note est : « *sous vide on peut faire bouillir l'eau à 0°* » (cf. article in chap.2, Tâche). C'est l'état sous vide de l'eau qui attire son attention. Il l'interprète à l'aune de sa connaissance initiale. Pour lui, la mise sous vide de l'eau consiste à rapprocher les propriétés de l'eau de celles du fréon pour l'évaporer à basse température.

Dans cette interprétation, on observe une transformation de sa connaissance initiale, même si elle est minime. Il considère le vide comme un état qui n'est pas inhérent au fluide lui-même mais à son environnement. BN utilise dans l'un de ses énoncés le terme « d'ambiance » de l'eau ou du fluide (G1S10931, G1S20146). Pour lui la mise sous vide consiste « donner des caractéristiques d'ambiance » (G1S20146). Il passe donc des propriétés intrinsèques du fluide à ses propriétés extrinsèques.

Il interprète donc le vide comme un changement des caractéristiques de pression de l'eau (G1S11111).

Il passe de la mise sous vide de l'eau, conçue comme une modification des caractéristiques de l'eau, à une conception de la mise sous vide comme une modification de la pression (G1S11111).

À la deuxième séance, on note qu'il considère de manière explicite le vide comme une basse pression.

« [...] T'as un vide ici donc forcément la pression s'abaisse. » (G1S20058)

Dans cette conception, il n'est pas encore en mesure de manipuler le vide en tant que variable indépendante du fluide.

Mais c'est un progrès par rapport à sa conception initiale.

Cette conception transitoire lui permet d'envisager une évaporation possible à basse température dans la canette. Mais elle n'est pas suffisante, à elle seule, pour expliquer la réfrigération dans ce système. L'évaporation de l'eau sous vide explique comment l'énergie thermique est extraite, mais n'explique pas comment elle est évacuée.

Il intègre cette nouvelle construction transitoire de l'évaporation dans son modèle initial. Il abordera la nouvelle situation avec un modèle initial modifié.

5.2.2. Conception d'une évaporation par une variation de la température et de la pression et par un apport de chaleur

Au cours de cette phase de l'apprentissage, BN procède à une seconde transformation de sa conception initiale de l'évaporation. L'évaporation s'effectue par une pression basse et une température basse avec un apport de chaleur

Dans une explication de l'évaporation, où la mise sous vide est conçue comme une basse pression, il établit une relation entre l'apport de chaleur, la basse pression et la température. Il estime qu'avec une basse pression une petite quantité de chaleur permet d'évaporer l'eau à 0° (G1S20112).

Il énonce le principe de vaporisation, mais dans sa forme appliquée à la situation nouvelle. Il affecte des valeurs approximatives aux variables : la pression est basse, la température aux alentours de 0° et la chaleur est moindre.

Seulement, lorsqu'il raisonne sur ce phénomène de l'évaporation tel qu'il est en jeu dans le système, il fait varier soit la pression, soit la température, en maintenant l'autre constante. Ces deux variables ne sont pas constantes pour lui :

« La pression, elle n'est pas constante et la température non plus. » (G1S30226)

Il s'écarte du concept général d'évaporation où la pression et la température demeurent constantes. Pour concevoir l'évaporation dans la canette, il hésite entre plusieurs

hypothèses dans lesquelles il fait varier soit la pression seule, soit la pression et la température ensemble. (G1S30521). Le fait de maintenir la température constante et de faire varier la pression correspond à une forme de raisonnement à variables réduites (Viennot, 1990).

Ce type de raisonnement oriente sa lecture du diagramme de phase et en donne une interprétation erronée. (G1S30224) (G1S30517) (G1S30521) (G1S30532)

Dans la situation, BN note que la pression varie dans la canette. Par exemple, quand l'eau s'évapore, elle produit une pression qui change l'état de la pression dans l'échangeur. A chaque variation, il n'est plus dans les conditions de pression de vaporisation. Quant à la température, elle ne varie pas, c'est toujours la température ambiante. Lorsqu'il fait varier la température, il fait varier en même temps la pression. Dans ce cas quand il fait varier la température, il pense que l'apport de chaleur provoque une augmentation de température. Ce qui est une erreur implicite, car lorsqu'on a atteint une température de vaporisation, tout apport de chaleur se traduit par une vaporisation et la chaleur se retrouve dans la vapeur, il ne modifie pas la température (cf. la tâche).

L'enseignante pointe cette erreur et énonce le concept général de changement de phase :

« Non, le changement de phase se fait à température et pression constante. Seulement le couple de pression-température lui il peut changer en fonction du diagramme de phase. » (ENS-G1S30536)

On note que la conception qu'a BN de l'évaporation est en contradiction avec le concept énoncé par l'enseignante. Il fait varier la pression et la température dans la situation à laquelle il est confronté. L'enseignante énonce le concept général hors situation. Ils se situent tous les deux dans deux registres différents : BN se situe dans le registre pragmatique, l'enseignante dans le registre épistémique.

Pour l'aider à comprendre le concept général, elle énonce les conditions générales d'un changement de phase, et fait appel à une analogie proportionnelle pour l'aider à les comprendre.

Dans cette analogie, deux situations différentes sont mises en jeu : la situation d'évaporation de l'eau dans une cuisine dans les conditions habituelles et celle qui est à la montagne. Le but est de mettre en évidence la variation du couple selon les situations et la constance des deux variables dans une même situation.

« [...] Quand vous êtes dans votre cuisine, vous avez de l'eau dans une marmite, vous la faites évaporer la température ça va être quoi ? » (ENS-G1S30536)

« Ça va être 100° » (ML-G1S30537)

« 100°, d'accord ! 100°, à quelle pression ? » (ENS-G1S30538)

« Atmosphérique » (BN-G1S30539)

« Pression atmosphérique. D'accord ! C'est pour une température donnée à une pression donnée. Mais si vous êtes ailleurs, une autre pression par exemple » (ENS-G1S30540)

« À la montagne » (BN-G1S30541)

« Ça va pas être la même température. Et ce couple pression-température vous pouvez les avoir avec le diagramme de phase. » (ENS-G1S30542)

On note que l'enseignante est impatiente. Elle donne la réponse sans mener jusqu'au bout le questionnement pour les amener à inférer la température à la montagne. Elle les renvoie au diagramme de phase pour le concept de vaporisation.

Lorsque BN tente d'expliquer l'évaporation dans la canette, il va continuer à faire varier alternativement la pression et la température.

BN et l'enseignante poursuivent 2 buts différents :

Ce que vise l'enseignante par cette analogie c'est l'acquisition du concept de changement de phase. Ce que vise BN c'est l'explication de l'évaporation telle qu'elle se produit dans la canette avec ses relations aux autres phénomènes en jeu dans le système. Même si BN n'a pas compris le concept de couple pression-température, il va continuer à progresser dans la conception de l'objet jusqu'à la construction de son MO.

Commentaire :

Ainsi, dans l'action sur la situation (ou dans la mise en jeu des opérations), on a l'impression que BN cherche à expérimenter, par la pensée, l'effet de la modification d'une seule variable à la fois. L'action par la pensée sur la situation ne produit pas une réaction réelle de la situation. Celle-ci se manifeste sous la forme d'une contradiction. Et tant qu'il ne rencontre pas de contradiction. Son raisonnement lui semble valable.

Nous verrons plus loin que cette conception de l'évaporation dans le système, qui lui permet d'avancer dans la construction de son modèle de l'objet, fera obstacle à l'acquisition du concept de couple pression-température et à l'acquisition du concept de vaporisation.

Ce n'est qu'à la fin, lorsqu'il va expliquer tout le processus de fonctionnement, qu'il va dépasser cet obstacle.

5.2.3. Conception initiale de l'adsorption :

Au début, il dispose du modèle initial du réfrigérateur comme ressource interne. Les ressources externes à sa disposition sont constituées par l'article de la revue et des dictionnaires usuels. Ces ressources vont lui permettre, dans un premier temps, d'élaborer une conception de l'adsorption qu'il va mobiliser dans l'explication de la canette.

Dans un second temps, cette conception de l'adsorption va évoluer suite à la transformation de son modèle initial, d'une part, et à l'apport de la documentation scientifique et technique, d'autre part. Nous verrons plus loin cette évolution.

Pour BN, comme pour l'ensemble des élèves engagés dans cet apprentissage, « adsorption » est un mot nouveau. À partir de la définition du dictionnaire usuel, il retient que l'adsorption correspond à la capture de l'humidité par pénétration superficielle. (Cf. énoncés : G1S10044, G1S10046, G1S10050, G1S10053).

Phonétiquement le mot adsorption est proche d'absorption qui désigne un phénomène qui a un rapport avec l'humidité. BN précise le concept d'adsorption en le distinguant de celui de l'absorption (G1S10044) (G1S10057). Ce qui est une manière de comprendre ce phénomène en le distinguant d'un autre connu.

L'adsorption est étudiée en liaison avec le dessicant. Il note que l'adsorption est une propriété des « dessicants » (G1S10069). Il réalise que c'est cette matière qui est utilisée dans les emballages de produits ou dans les locaux pour lutter contre l'humidité. Le concept ne lui est pas totalement inconnu, mais le processus par lequel s'effectue l'adsorption est encore assez vague. C'est avec cette conception de l'adsorption qu'il aborde au départ le fonctionnement de la canette.

Très vite après, BN va mobiliser la conception qu'il s'en est faite, dans le fonctionnement de la canette. Durant tout le reste de l'apprentissage, il va l'étudier en rapport avec les autres phénomènes dans la canette. Cette mise en rapport est suggérée par le texte de l'article. Celui-ci met l'accent sur le rôle de l'adsorption et du dessicant dans le fonctionnement de la canette. Ce texte informe BN que :

- le dessicant adsorbe la vapeur produite ;
- le dessicant évacue la vapeur ;
- le dessicant agit dans le processus comme une pompe.

Le texte l'informe également que le dessicant remplit un rôle dans le système de la canette analogue à celui que joue la terre cuite dans la cruche pour rafraîchir la boisson. Ce rôle consiste à évacuer l'énergie extraite de la boisson.

BN interprète les données du texte de l'article à partir de son modèle global du réfrigérateur. Il estime que la cruche en terre cuite fonctionne sur « *le même principe que le frigo* ». (G1S10991-G1S10992). L'eau en s'évaporant « *extrait de la chaleur qui va se déposer ailleurs par condensation.* » De cette analogie de la cruche en terre cuite, il infère que le dessicant utilisé dans la canette doit avoir la même structure poreuse que la terre cuite de la cruche. (G1S10992)

Le développement de la conception de l'adsorption et de son rôle dans le fonctionnement du système va se faire dans deux directions principales : le rôle de l'adsorption et du dessicant dans le transfert d'énergie et son évacuation, et leur rôle dans l'évaporation.

Dans cette première partie de l'étude de l'adsorption, la mise en jeu de l'adsorption et du rôle du dessicant dans le transfert thermique va prendre le pas sur leur rôle dans l'évaporation.

Dans un premier temps, il considère que ce phénomène intervient directement à la fois dans le transfert et dans l'évacuation de la vapeur.

Ensuite, il revient sur le processus d'adsorption lui-même et tente de comprendre comment il se réalise dans la canette.

5.2.3.1. Explication de l'adsorption par la transformation dans le dessicant de la vapeur en liquide

Il tente d'expliquer le processus d'adsorption en faisant appel à l'analogie de la cruche.

Lors de la première séance, il a noté que la cruche en terre cuite est faite en argile qui est une matière poreuse. (G1S10992) Les pores constituent des alvéoles dans lesquelles se loge le fluide liquide.

Il estime que l'adsorption consiste à capturer l'humidité, sous forme liquide dans le dessicant. Il considère que lors du transfert de la vapeur, celle-ci est transformée en liquide pour être adsorbée par le dessicant : « *elle est adsorbée et devient liquide enfin elle devient liquide dans le dessicant* » (G1S20104). BN introduit une condition à l'adsorption : la transformation de la vapeur en liquide pour que le fluide puisse pénétrer les alvéoles du dessicant.

Ce qui constitue un progrès important dans la conception de l'adsorption.

Mais cette conception de l'adsorption ne permet pas encore de comprendre comment l'adsorption assure l'évacuation de la chaleur transférée dans le dessicant.

5.2.3.2. Explication de l'adsorption et du transfert thermique par le vide dans la cavité du dessicant :

Dans un premier temps, il considère que l'adsorption assure à elle seule le transfert thermique.

Il note l'existence du vide dans la cavité du dessicant. Il associe le vide et l'adsorption dans ce transfert thermique.

Il revient sur l'adsorption et considère qu'elle se fait par le vide situé dans la cavité du dessicant (G1S20056). Dans ce même énoncé, il considère que le vide abaisse la pression. Il ne mobilise pas ici la propriété intrinsèque du dessicant, mais un facteur externe : le vide réalisé dans la cavité du dessicant. En raison de ce vide, le dessicant agit comme une ventouse (G1S20058) comme une pompe à vapeur (G1S20131) pour déplacer la vapeur.

Dans cette hypothèse, BN explique l'adsorption et le transfert thermique par la fonction que remplit le vide dans la cavité du dessicant. Par ce processus, la chaleur est transférée dans le dessicant, et la boisson est refroidie (G1S20093).

Cette conception minimale de l'adsorption ne permet pas de comprendre avec précision comment elle intervient dans le transfert thermique dans la canette.

5.2.4. Conception d'un transfert thermique par dépression :

BN cherche à comprendre comment s'effectue la réfrigération par le système de la canette. Il dispose d'un modèle initial modifié dans lequel il a une conception transitoire ou intermédiaire de l'évaporation dans la canette. Mais la conception de l'évaporation ne suffit pas pour expliquer le rafraîchissement. Il faut expliquer comment s'effectue le transfert thermique.

Le principe du transfert thermique dans la réfrigération est le même dans les deux situations : connue et nouvelle. Mais les processus ne sont pas les mêmes. Cette différence est le fait en partie de la géométrie des deux systèmes techniques⁵⁶ et en partie des processus : dans le réfrigérateur, l'énergie est évacuée à l'extérieur ; dans la canette, elle reste à l'intérieur, elle est évacuée dans le dessicant. Dans le réfrigérateur, la réfrigération s'effectue par l'apport extérieur d'une énergie électrique qui fait fonctionner le système. La canette

56 - Rappel : la géométrie joue un rôle dans le processus. Dans le réfrigérateur, l'échange se fait par un circuit dans lequel le fluide réalise une révolution cyclique. A chaque cycle, il extrait l'énergie à l'intérieur et l'évacue à l'extérieur. Lors de cette révolution il s'évapore en extrayant de l'énergie, il se liquéfie en cédant cette énergie à l'extérieur. Dans la canette il n'y a pas de circuit. Le processus est irréversible. Il n'y a pas de retour possible du fluide dans l'échangeur thermique.

fonctionne sans apport extérieur d'énergie. Le système est mis en route par l'ouverture de la valve.

Le modèle du réfrigérateur se révèle inadapté pour comprendre le fonctionnement de la canette, notamment à propos du transfert thermique.

BN n'évoque pas dès le premier coup, la dépression dans le transfert thermique.

De la conception de la dépression vont naître d'autres conceptions du transfert thermique d'origine empirique.

Il s'agit d'un transfert par l'action de la valve.

BN ne dispose d'aucune information au départ sur la géométrie de la valve ni sur son mode d'action. Il fait appel à sa connaissance du fonctionnement d'une valve de vélo. Il estime que la valve de la canette doit fonctionner comme une valve de vélo : il assimile la valve de la canette à une valve de vélo et la vapeur dans l'échangeur thermique à un gaz ou à l'air sous pression dans la chambre à air de la roue d'un vélo. Il suppose que lorsqu'on appuie sur la valve de la canette, la vapeur s'échappe, comme l'air de la chambre à air du vélo. L'ouverture de la valve détend la vapeur dans la canette. C'est cette détente qui déplace la vapeur produite (G1S20206).

L'hypothèse d'un transfert thermique fondée sur l'action du mécanisme de la valve calqué sur celui d'une valve de vélo est en contradiction avec la situation.

La première contradiction est relevée par un collègue. L'extraction de l'air de la roue du vélo se fait tant que l'on appuie la valve. Lorsqu'on n'appuie plus, l'air n'est plus évacué. L'effet de l'action de la valve ne dure que le temps au cours duquel on appuie. Si on appliquait cette hypothèse à la valve de la canette, le transfert d'énergie ne s'effectuerait que lorsqu'on agit sur le bouton-poussoir qui actionne l'ouverture de la valve.

La réponse de la situation : on n'appuie qu'une seule fois pour démarrer le système et le processus se poursuit durant 5mn. (DL-G1S20207) (BN-G1S20208)

BN infère de ces deux faits que l'on appuie une seule fois, et que la valve reste ouverte en permanence. Donc la valve de la canette ne doit pas fonctionner comme une valve de vélo.

Il abandonne l'assimilation d'une valve de la canette à une valve de vélo. Mais il garde le principe de la détente du gaz. Seulement ce principe repose sur une pression forte d'un côté.

Dans cette même conception du transfert thermique impliquant la valve, BN combine l'action de celle-ci à celle du vide dans le dessicant.

La contradiction ne porte pas seulement sur l'action de la valve, mais aussi sur l'action du vide.

Il estime que lorsqu'on ouvre la valve, le dessicant adsorbe la vapeur (G1S20058). L'adsorption se fait par le vide dans la cavité du dessicant (G1S20056). En raison de ce vide, le dessicant agit comme une ventouse, comme une pompe à vapeur (G1S20131).

La situation lui répond par le biais du point de vue d'un collègue : Le transfert thermique ne se fait pas par le vide, parce que celui-ci existe des deux cotés (G1S20210). Pour que le vide agisse comme une pompe à vapeur et assure le transfert thermique, il faut qu'il soit présent d'un seul coté. S'il existe des deux côtés, à l'ouverture de la valve, les actions des deux vides s'annulent.

Cependant, si l'hypothèse d'un transfert thermique par le vide et par la valve, fonctionnant comme une valve de vélo, se révèle inadaptée à la situation nouvelle, elle introduit chez BN la notion de pression. L'air dans la roue de vélo est sous *pression*, de sorte que lorsqu'on ouvre la valve, l'air s'échappe par dépression. Quant au vide dans la cavité du dessicant, il aspire ou il pompe la vapeur parce qu'il est conçu comme une *absence de pression* ou une *pression faible*. Dans les deux cas, il y a un lien avec la *pression*. Dans les deux cas, il y a une *différence de pression* : entre l'air dans la roue de vélo et l'air extérieur, et entre la cavité de l'échangeur et la cavité du dessicant. La conception d'une différence de pression est implicite.

Dans un énoncé ultérieur, BN abandonne l'hypothèse d'un transfert d'énergie par la valve et par le vide dans le dessicant. Il estime que lorsque la valve s'ouvre, une dépression se produit et assure le transfert de la vapeur vers le dessicant :

« *On va actionner la valve, on aura une différence de pression et là, on aura un transfert* » (G1S20439)

La conception d'un transfert thermique par dépression pose le problème de l'origine de celle-ci. L'explication de l'origine de la dépression passe par la conception d'une augmentation de la pression. BN estime que lorsque l'évaporation a lieu, la vapeur produite augmente la pression.

Cette explication est reprise dans plusieurs énoncés (G1S20211) (G1S20213) (G1S20215) (G1S20229)

« [...] elle (l'eau) serait liquide et qu'elle vaporise, à mon avis ce serait là que la pression augmente (G1S20231).

« [...] ton eau est vapeur, donc augmente la pression, tu ouvres la valve, tu casses la pression » (G1S20317)

Dans toutes ces explications, il note que la vapeur est produite avant l'ouverture de la valve. C'est la condition nécessaire pour que la dépression se produise à l'ouverture de la valve et au démarrage du système.

Cette construction du phénomène de dépression au démarrage du système est un progrès dans la construction de l'objet technique. La conception d'un transfert thermique par dépression à l'ouverture de la valve lui permet d'accéder au premier rôle que joue ce phénomène dans le processus de la canette. La documentation technique va lui apporter une confirmation de son hypothèse. Mais sa conception ne sera stabilisée qu'à la fin de la construction d'un modèle totalement adapté à la situation nouvelle.

5.2.5. Conception d'un état diphasique de l'eau avant l'ouverture de la valve :

Nous rappelons que, dans les changements de phase, l'état diphasique correspond à la coexistence d'un état gaz (ou vapeur) et d'un état liquide d'un fluide. C'est un état intermédiaire ou état d'équilibre entre l'état liquide et l'état vapeur.

Il faut noter que ce phénomène a un rapport, dans le fonctionnement de la canette, avec l'état initial du fluide, d'une part, et avec son démarrage et son fonctionnement ultérieur, d'autre part.

L'état diphasique est l'un des phénomènes importants dans le fonctionnement du système. En tant que phénomène, c'est un état que chacun peut observer par exemple lors de l'ébullition de l'eau dans une casserole d'eau sur le feu. Il y a du liquide et des bulles de gaz qui se forment à l'intérieur et se détachent de l'eau liquide pour constituer la vapeur. Dans cette situation, la vaporisation continue tant qu'il y a de l'eau sous forme liquide dans la casserole. La présence simultanée de gaz (ou vapeur) et de liquide correspond à un état diphasique. Dans le réfrigérateur, le fluide n'est pas totalement liquide ou totalement vapeur. En tant que concept, l'état diphasique n'est pas évident à définir d'une manière précise à partir d'une simple observation empirique. Dans la conceptualisation de ce phénomène, on a tendance à concevoir la phase vapeur à part et la phase liquide à part, et on les pense séparément. Il faut disposer du concept pour concevoir ce phénomène comme un état intermédiaire d'un équilibre entre ces deux phases.

Lorsque BN pense à l'évaporation dans la canette, il raisonne en termes de tout ou rien : ou l'eau est totalement liquide avant l'ouverture de la valve, ou elle est totalement vapeur.

Dans l'hypothèse d'une évaporation totale avant l'ouverture de la valve, BN suppose que le refroidissement de la boisson a lieu avant l'ouverture de la valve. Ce qui est en contradiction avec la situation : le rafraîchissement de la boisson ne commence qu'après l'ouverture de la valve qui démarre ce processus.

L'hypothèse d'une évaporation totale après est en contradiction avec sa conception :

— d'une évaporation de l'eau sous vide par un apport de chaleur fourni par la boisson avant l'ouverture de la valve (G1S20095) (G1S20517) ;

— d'un transfert thermique par dépression à l'ouverture de la valve, dépression qui n'est possible pour lui que par une pression de vapeur (G1S20439).

BN dispose du « concept en acte » de l'état diphasique, mais il n'est pas présent à sa conscience, il ne peut donc pas le manipuler par la pensée hors de la situation vécue.

La documentation technique lui fournit le concept de l'état diphasique :

« [...] Quand t'as ton liquide qui est à l'état liquide, t'as une zone de vapeur au-dessus à la surface de ce liquide. » (G1S30306)

Cette conception de l'état diphasique avant l'ouverture de la valve rend possible une évaporation avant, qui ne rafraîchit pas la boisson, et une évaporation après qui enclenche le processus de rafraîchissement. C'est une sorte de résolution dialectique de deux conceptions opposées.

Cette conception résout un problème, mais elle n'apporte pas la solution globale.

5.2.6. Conception d'une évaporation par dépression au démarrage du système :

L'existence de la dépression dans le fonctionnement de la canette est un fait établi chez BN. Elle lui a permis d'expliquer le transfert d'énergie de l'échangeur vers le dessicant. La documentation technique recueillie lors de la 3^e séance l'informe d'une évaporation provoquée par une dépression. (G1S30824). Mais elle ne lui fournit aucune explication sur ce phénomène. BN cherche d'abord à établir le fait d'une évaporation par dépression, ensuite il se demande comment la dépression peut agir directement sur l'évaporation. Il teste diverses hypothèses qui ne donnent aucun résultat.

Il remémore une expérience qu'il a observée sans se l'expliquer. Il s'agit de l'expérience de l'évaporation dans une seringue.

« [...] tu prends une seringue, tu mets de l'eau dedans, tu as une dépression dedans, t'as l'ébullition de ton eau. » (G1S30167)

Il reprendra en détail la description de cette expérience à la quatrième séance (G1S40844). Lorsqu'on tire sur le piston d'une seringue contenant de l'eau, en bouchant

l'embout avec le doigt, une évaporation se produit. Pour BN, le fait de tirer sur le piston crée une dépression. Dans l'interprétation du phénomène, il établit un lien direct entre la dépression et l'évaporation ; il admet l'évaporation par une action directe de la dépression grâce à cette remémoration Mais il ne comprend pas encore comment la dépression produit l'évaporation.

Cependant, le lien entre la dépression et l'évaporation prend un sens pour lui par ce fait observé auparavant C'est une forme d'établissement du fait de l'évaporation par la dépression dans la canette par le recours à une situation vécue ou connue. Par cet exemple, BN établit une relation de causalité directe entre ces deux phénomènes.

Une fois le fait établi, il cherche à l'expliquer. BN se centre sur la séquence de l'évaporation dans l'échangeur. En cherchant à l'expliquer par la dépression, il s'interroge à nouveau sur l'origine de celle-ci.

Pourtant, lors de la 2^e séance, BN a déjà expliqué le processus de la dépression en précisant son origine. (G1S20227) (G1S20229) (G1S20231) (G1S20276) (G1S20280) (G1S20317) Dans ces différents énoncés, l'explication de la dépression est claire. Seulement elle est construite dans le contexte de l'étude du transfert d'énergie de l'échangeur vers le dessicant. Lors de cette étude, BN est centré sur la séquence du transfert thermique.

La séquence qu'il étudie, lors de cette troisième séance, concerne l'évaporation. Jusqu'ici, pour lui l'évaporation se fait sous vide ou à basse pression, à une température ambiante avec un apport de chaleur fourni par la boisson. Les éléments invariants essentiels à une évaporation sont réunis. Mais les relations précises qu'entretiennent ces éléments ne sont pas encore acquises. Pour évaporer dans la canette, il fait varier la pression et la température.

Son collègue MC l'informe, en se référant à la documentation technique recueillie, qu' « *elle (l'eau) s'évapore d'abord sous l'effet d'une dépression.* » (G1S31055)

Mais cette explication ne porte que sur l'évaporation isolée du reste des autres phénomènes.

Or cette nouvelle information remet en question ses deux constructions précédentes. Pour lui, l'évaporation se réalise sous vide ou sous basse pression. Quant à la dépression, elle intervient dans le transfert thermique vers le dessicant. Ces deux conceptions lui semblent en contradiction avec une évaporation par dépression.

Cette nouvelle information perturbe ces deux constructions. Mais il est obligé de l'admettre, puisque les textes soutiennent ce fait (G1S31052)

Il s'interroge sur ce fait parce qu'il du mal à se l'expliquer :

« *Ce que j'aimerais savoir c'est : est-ce qu'il y a une pression, comment l'évaporation se fait ?* » (G1S31546)

Il remet en question cette information nouvelle, et considère que l'évaporation « *ne se fait pas à partir d'une dépression, elle se crée à partir du dessicant, c'est le dessicant qui est moteur de l'évaporation* » (G1S40083).

Il n'est plus sûr des conceptions élaborées avant. L'évaporation par dépression désorganise tout son modèle. C'est la preuve que ce modèle demeure instable jusqu'à la construction complète et définitive.

Il faut noter que toutes les informations nécessaires à l'explication du fonctionnement de la canette sont éparpillées dans divers brevets. Les liens entre ces informations ne sont pas donnés. Certaines informations semblent contradictoires.

Pour avancer, il tente d'expliquer ce phénomène en l'abordant par le volume de la vapeur. Il estime que si l'on supprime le volume de vapeur cela crée une dépression. L'adsorption de cette vapeur par le dessicant va libérer de la place pour une nouvelle évaporation de l'eau liquide, qui va remplacer celle évacuée. (G1S40145)

La possibilité d'une évaporation par dépression commence à devenir envisageable.

« *à mon avis, l'évaporation, c'est forcément sous l'effet de la dépression.* » (G1S40246)

Ensuite, il glisse de la diminution des volumes à la diminution de la pression. (G1S40264)

« *[...] tu diminues ton volume, donc tu diminues ta pression* » (G1S40264).

Il conçoit que la vapeur produite a tendance à occuper plus de volume. En augmentant de volume, elle exerce une pression. Autrement dit, le dégagement de la vapeur conduit à une libération de l'espace sur lequel elle exerçait une pression par son volume, et du coup la pression diminue.

Il reprend à nouveau l'exemple de la seringue, qui a du sens pour lui, dans une explication plus assurée :

« *[...] Tu prends une seringue tu mets de l'eau dedans, t'as de l'eau t'as de l'air, tu bouches l'entrée de la seringue, tu tires sur la seringue (il parle du piston), qu'est ce qui va se passer ? [...] Ton eau va entrer en ébullition. Pourquoi ? Parce que tu crées une dépression ; donc quand tu fais sous vide, l'environnement de ton eau, t'as de la vapeur qui se crée [...]* » (G1S40844)

C'est la version complète de l'expérience de la seringue déjà évoquée auparavant. Autrement dit, si on prend une seringue en pyrex contenant un peu d'eau. Lorsqu'on tire sur le piston en bouchant l'embout, il se produit une évaporation. Pour BN, l'action de tirer de piston vise à provoquer une dépression (G1S30167). Ce qui a pour effet de vaporiser l'eau qui

est à température ambiante. Cette situation connue est proche de la situation de la canette. Mais elle ne porte que sur un seul phénomène isolé : l'évaporation à basse température. Du coup, cette situation vécue et non conceptualisée prend un sens qui résulte de la relation entre une dépression et une évaporation à basse température. En même temps il conçoit que, dans la canette, l'évaporation par dépression devient possible. Il accède donc au deuxième rôle de la dépression dans le fonctionnement de la canette. Pour comprendre comment la dépression provoque une évaporation, BN fait intervenir deux constructions : l'état diphasique et la pression de vapeur.

Mais cette conception est aussi instable, tant qu'il n'a pas construit le modèle complet du fonctionnement de la canette. Son modèle de fonctionnement de la canette devient plus étoffé. Mais il lui manque encore quelques éléments pour se rapprocher de la structure conceptuelle de la situation nouvelle. Et tant que ces éléments lui font défaut, il est encore instable. On vient de noter qu'une simple contradiction portant sur un de ses éléments suffit pour qu'il soit remis en question dans sa totalité.

5.2.7. Développement de la conception initiale de l'adsorption :

Le développement de la conception initiale de l'adsorption passe par l'accès à la notion de forces de van der Waals. Cet accès s'est réalisé grâce à l'apport du texte. Cette notion parachève sa conception de l'adsorption. Elle lui permet d'expliquer comment les molécules d'humidité sont attirées par un dessicant et fixées à la surface de sa structure. (G1S30791) (G1S30793) (G1S30798)

Ce qui est intéressant à noter ce sont les conceptions associées ou inférées à partir de ce processus :

- le phénomène est irréversible, une fois l'eau piégée dans le dessicant, elle ne peut plus revenir dans l'échangeur ;
- le transfert de la vapeur dans la cavité du dessicant ramène la pression dans la cavité de l'échangeur à son état initial ;
- le transfert de la vapeur dans la cavité du dessicant modifie la pression qui y règne ;
- l'adsorption transforme la vapeur en liquide, ce qui a pour effet de ramener la pression dans la cavité du dessicant à son état initial ;

– l’adsorption donne lieu à une augmentation de la température dans le dessicant par accumulation de la chaleur transférée dans la vapeur. Par conséquent, la chaleur extraite de la boisson ne peut plus revenir dans l’échangeur ou dans la boisson.

BN dispose de tous les éléments pour énoncer sa conception du fonctionnement du système.

5.2.8. Conception du fonctionnement du système par reconfiguration de l’ensemble dans un modèle cohérent :

A partir de la troisième séance le MO de BN du fonctionnement de la canette est presque totalement transformé. A la quatrième séance il présente à ses collègues sa conception de l’objet technique dans deux énoncés (G1S40857) (G1S41003). Il reprendra aussi pour le groupe 2, l’explication de l’effet simultané de la dépression sur le transfert et l’évaporation après l’ouverture de la valve (G1S41099 à G1S41109).

BN cherche à établir un état initial où l’eau n’a pas eu contact avec la chaleur ambiante. Dans une explication, il part l’état de l’eau et de la boisson, lors de la fabrication de la canette, avant le contact avec la chaleur ambiante. Dans une autre, il préconise de mettre la canette dans un réfrigérateur. Dans les deux cas, l’eau est à l’état liquide et froide.

L’eau et le dessicant sont mis sous vide. L’état sous vide est l’équivalent d’une basse pression pour BN. À la sortie du réfrigérateur (équivalent de la sortie d’usine), la boisson est mise en contact avec la chaleur ambiante. La boisson prend la chaleur du milieu ambiant. Il se produit un déséquilibre thermique entre la boisson et l’eau de l’échangeur. Pour rétablir l’équilibre thermique entre ces deux matières, la boisson transmet sa chaleur à l’eau, dans un échange thermique par conduction, via la paroi de l’échangeur, jusqu’au rétablissement de l’équilibre. La chaleur transmise par la boisson évapore partiellement l’eau mise sous vide. La vapeur provoque une augmentation de la pression dans l’échangeur. La pression dans l’échangeur est supérieure à celle qui règne dans le dessicant qui est toujours sous vide. En raison de cette différence de pression, il se produit une dépression à l’ouverture de la valve. Cette dépression évacue la vapeur existante dans l’échangeur vers le dessicant. L’évacuation de la vapeur abaisse la pression qu’elle a générée avant dans l’échangeur. L’eau liquide qui reste dans l’échangeur se retrouve à l’état initial sous vide. Elle peut s’évaporer. Elle est à nouveau dans les conditions de pression et de température d’évaporation. Dans ces conditions, l’eau pour s’évaporer à besoin d’énergie. Il extrait cette énergie à la boisson qui est toujours à la température ambiante. C’est à ce moment que la température de la boisson baisse en cédant de l’énergie à l’eau pour l’évaporer. Dans sa manière de présenter le fonctionnement de la

canette, BN laisse supposer que ce phénomène global se répète d'une manière cyclique durant 5mn jusqu'à l'épuisement de la quantité d'eau dans l'échangeur.

Ce qui manque à sa conception finale est indiqué ci-dessous en pointillé dans le schéma de la structure conceptuelle complète de la situation.

Il ne donne pas toutes les précisions sur le transfert thermique par convection, entre l'eau et le dessicant. Il n'a pas évoqué l'énergie cinétique.

Il n'a pas précisé le rôle de la pression de vapeur saturante dans le réglage de l'évaporation et le maintien de l'état diphasique lors du processus.

Son explication relève « presque » du raisonnement systémique. Il évoque les deux effets rétroactifs importants : l'effet rétroactif de la dépression sur la pression de vapeur (la pression s'équilibre), et l'effet rétroactif de l'apport de la chaleur à l'eau sur l'état thermique de la boisson : le refroidissement.

Mais BN n'aura pas le temps d'aller jusqu'au bout de la conception de cet aspect systémique.

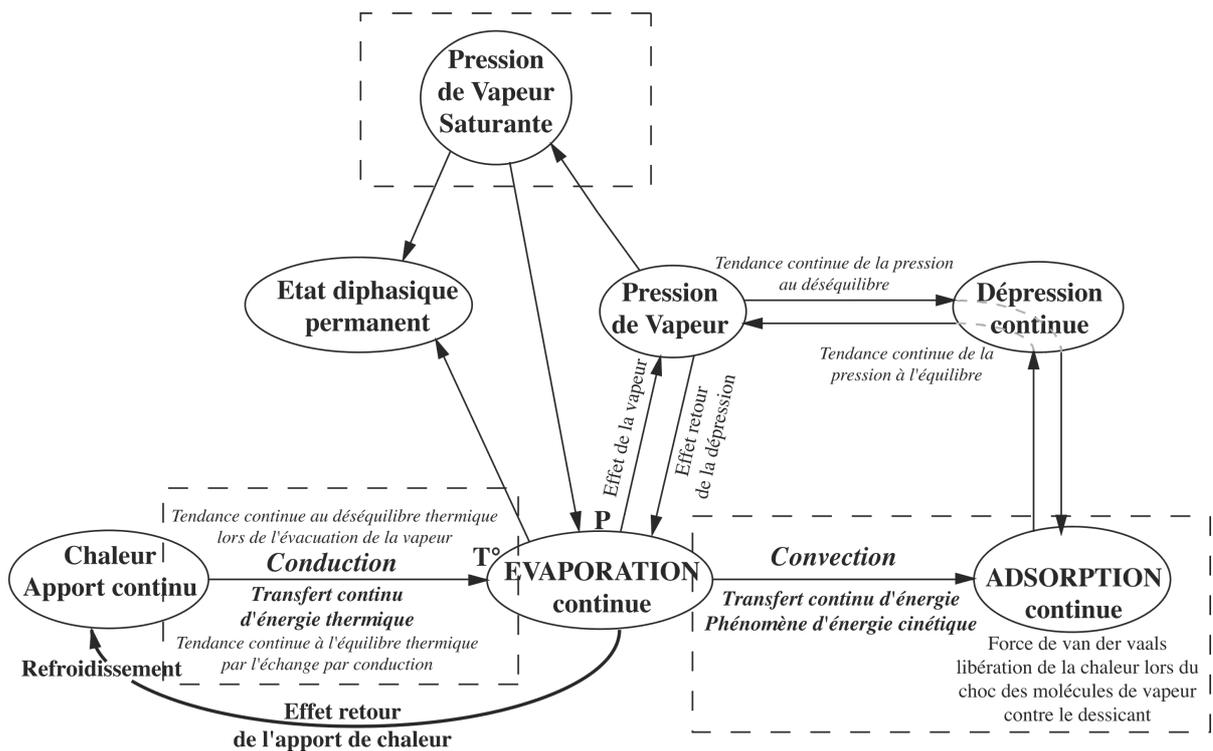


Figure 18. Schéma du MO de BN superposé à celui de la structure conceptuelle de la situation. Les dimensions incomplètes sont mentionnées en pointillé.

Cependant, on peut noter qu'entre son explication du départ et cette dernière, il y a une grande différence. Son modèle de départ est complètement transformé. Ce modèle a contribué à la construction du modèle de la situation nouvelle.

5.3. Construction des concepts chez BN :

Tous les concepts, qui constituent le MO du fonctionnement de la canette, construits par BN sont des concepts mobilisés dans cette situation nouvelle. Ce sont, pour la plupart, des concepts élaborés à partir de ceux constituant le MO analogique du réfrigérateur. Mais à un moment donné lors de la troisième séance, l'enseignante les a poussés à apprendre le cours sur les changements de phase. Des six changements de phase possibles, seule la vaporisation est mise en jeu dans la canette.

5.3.1. Cas particulier du concept d'évaporation :

BN s'est efforcé de comprendre comment s'effectue l'évaporation dans la canette en liaison avec les autres phénomènes en jeu dans le système.

En principe, le concept d'évaporation mobilisé dans le système, qui est l'un des piliers du MO à construire, doit être transformé par la suite en concept scientifique. Mais avant de le transformer en concept scientifique BN doit d'abord résoudre le problème de l'évaporation dans la canette.

L'explication de l'évaporation dans la canette s'est effectuée par étapes :

BN part d'une conception de l'évaporation à basse température fondée sur les propriétés intrinsèques du fréon.

5.3.1.1. Étape 1 :

Dans la situation nouvelle, ce n'est pas le fréon qui s'évapore, c'est l'eau. Pour BN, l'eau ne s'évapore qu'à 100°. Cette conception est en contradiction avec la situation où l'eau s'évapore à basse température.

BN découvre d'abord l'intervention de la pression sous vide dans l'évaporation à basse température.

5.3.1.2. Étape 2 :

Il établit un lien entre la basse température, la basse pression et l'apport de chaleur.

La relation entre la température et la pression est construite grâce à l'analogie proportionnelle proposée par l'enseignante. Mais dans la canette, BN continue à faire varier les deux variables ou une seule en maintenant la seconde constante.

La relation entre l'apport de chaleur et la température n'est pas tout à fait maîtrisée.

5.3.1.3. Étape 3 :

L'enseignante énonce le concept de changement de phase. BN comprend que la pression et la température constituent un couple. Mais il ne sait pas ce qui varie et ce qui reste

constant : le couple ou la pression et la température considérées l'une indépendamment de l'autre.

Dans une interaction avec sa collègue VA, il se trompe au départ, et il finit par comprendre le concept complet de vaporisation et construire le concept sous-jacent de couple pression-température.

BN : c'est le couple qui est constant (GIS30586)

VA : enfin c'est non le couple varie (GIS30587)

BN : non, c'est P constant T constant mais le couple varie (GIS30589)

VA : pendant la phase de transformation, elles restent constantes, mais ils peuvent varier (GIS30590)

BN : oui c'est ça, par exemple quand c'est quand t'es dans ta cuisine P 1 et T1 d'accord et ton eau elle s'évaporerà à 100°, elle s'évaporerà une fois qu'elle a atteint 100°, d'accord. (GIS30591)

VA : le couple peut varier, mais à une température et une pression (GIS30592)

BN : quand t'es en montagne, la pression sera différente et la température elle sera différente et ton évaporation elle sera elle aura lieu à un couple différent et pas à la même pression (GIS30593)

5.3.2. Le concept d'adsorption :

L'adsorption est un concept qui n'appartient pas à la structure conceptuelle du réfrigérateur et au MO de BN. Il a été construit par le texte en deux étapes : BN a construit une conception initiale minimale de l'adsorption, à partir des données du texte de l'article et des définitions des dictionnaires usuels. Cette conception a été mobilisée dans la situation nouvelle. La confrontation à celle-ci a permis de préciser les questions à propos de ce phénomène. L'apport de la documentation technique et scientifique a donné une réponse à ces questions et a permis à BN de construire le concept définitif de l'adsorption.

5.3.3. Quelques commentaires :

5.3.3.1. Le processus cognitif :

C'est le processus d'équilibration alternant l'assimilation et l'accommodation.

Une connaissance est mobilisée au départ pour assimiler le système de la canette. La situation répond par une contradiction. L'accommodation est mise en jeu. La connaissance

mobilisée est transformée. Celle-ci est mobilisée à nouveau pour assimiler le système. La situation répond par une autre contradiction. La nouvelle connaissance est à son tour transformée.

La genèse se poursuit selon ce processus jusqu'à l'étape finale.

Ce processus n'est pas linéaire. Il y a des impasses et des retours en arrière.

Le meilleur exemple est celui du retour sur la conception de la dépression.

5.3.3.2. Le mode d'apprentissage :

L'enseignante a cherché constamment à leur faire acquérir le concept de changement de phase en s'appuyant sur leurs difficultés à expliquer l'évaporation dans la canette. On a vu chez BN que la fourniture du concept ne l'a pas aidé à résoudre son problème de l'évaporation dans la canette. Il est revenu après à sa conception de l'évaporation dans laquelle il fait varier la pression et la température.

L'enseignante n'a pas respecté les deux temps d'un apprentissage par les situations : le temps de la résolution du problème ou de sa définition, et le temps de la génération de la solution.

Le but de l'enseignante et celui de BN ne sont pas les mêmes. Celui de l'enseignante est l'acquisition du concept de changement de phase. La situation proposée ne cible pas uniquement ce concept. À la limite, pour faire acquérir le concept de changement de phase, l'analogie proportionnelle aurait suffi. On pourrait à la rigueur choisir une situation qui ne cible que ce concept et respecter les deux moments de l'apprentissage que suggère Brousseau (1998) : 1/ le moment de la résolution du problème de fonctionnement de la canette, 2/ et le moment de la généralisation de la solution, formulation et institutionnalisation du savoir. La situation proposée nécessite la mobilisation de ce concept dans un système où le phénomène qu'il désigne n'est pas isolé du reste.

Si le but est d'acquérir simplement le concept général de changement de phase, le passage par la définition du problème que supporte cette situation complexe s'avère trop coûteux.

Le but de BN est de concevoir l'objet technique. Cette conception ne se limite pas à la construction d'un seul concept, même si le phénomène qu'il désigne occupe la place la plus importante dans le système. Cette conception du système technique nécessite la construction d'une structure conceptuelle du fonctionnement de l'objet, qui articule plusieurs concepts reflétant les relations entre les phénomènes dans le système et leurs interactions.

5.4. Conception de l'objet technique chez DL :

Chez DL, le modèle opératif est différent de celui du concepteur, il est plutôt proche de celui de l'utilisateur ou du dépanneur. L'utilisateur n'a pas besoin de connaître avec précision la géométrie de l'objet technique ni son fonctionnement. Il a besoin juste de savoir comment le faire démarrer et l'arrêter (sur quel bouton appuyer). Le dépanneur a besoin de connaître avec précision sa géométrie et l'action de chacun de ses composants, mais il n'a pas besoin de connaître avec précision la théorie qui le fonde.

DL a une approche de technicien au sens classique du terme. Il est capable de détecter le composant défectueux et sait comment le réparer. Les techniciens sont aujourd'hui plus avancés sur le plan théorique, mais leurs connaissances théoriques ne leur permettent pas d'inventer un objet technique en partant de la théorie. Il faut plus compétence dans ce domaine.

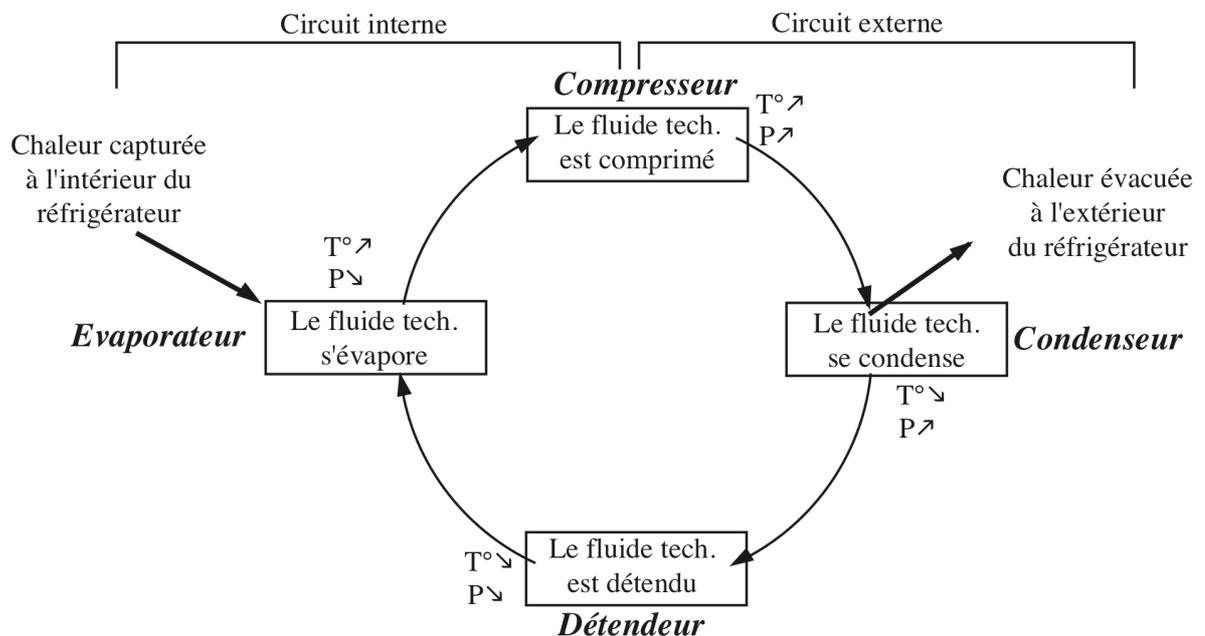


Figure 19. MO du réfrigérateur chez DL

Lors de la première séance, il prend connaissance du texte de l'article. Il participe aux définitions des termes, notamment du concept d'adsorption et de dessiccant. Il participe, avec BN, à la reconstitution du modèle du réfrigérateur.

5.4.1. L'évocation de la situation connue par DL :

Sa participation porte sur la reconstitution des composants du circuit de l'échangeur thermique du réfrigérateur

Il estime qu'il y a quatre étapes de transformation du fluide (G1S10220)

Il cite deux composants où s'effectuent les transformations du fluide : l'évaporateur et le condenseur (G1S10222)

En réaction à l'énoncé de BN à propos de l'état du fluide dans l'évaporateur, il indique qu'il est à l'état de vapeur saturée, de vapeur chauffée, qu'il extrait de la chaleur (G1S10231)

Il corrige l'énoncé de son collègue BN et indique que le fluide est à l'état de liquide plus vapeur jusqu'au détendeur (G1S10232)

Il n'est pas d'accord avec BN lorsqu'il prétend que le fluide est quasiment liquide à l'entrée de l'évaporateur (G1S10234) et qu'il est à l'état vapeur quand il arrive dans le détendeur. (G1S10240). Il estime que l'eau est à l'état liquide quand elle arrive dans l'échangeur.

Il le corrige également lorsqu'il prétend qu'on détend de la vapeur et non du liquide. Il affirme qu'on détend du liquide (G1S10240)

Il complète le schéma de l'échangeur thermique du réfrigérateur (G1S10240) et il indique la position du condenseur qui se situe à l'opposé de l'évaporateur (G1S10240)

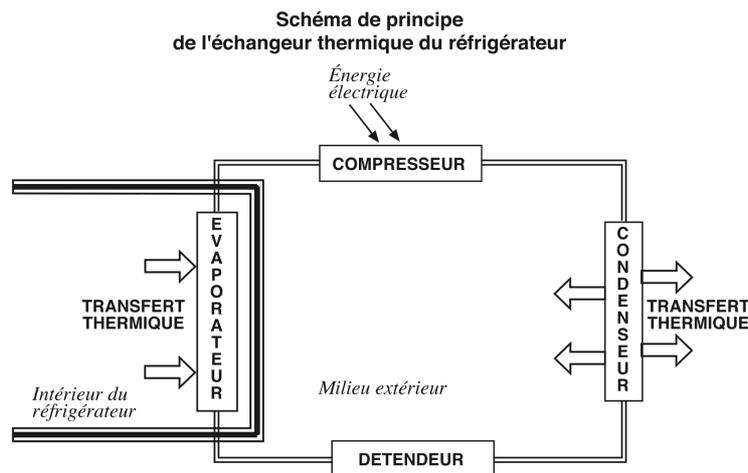


Figure 20. Le schéma que réalise DL en corrigeant l'ébauche faite par son collègue BN

Il précise que le fluide sort sous forme liquide du condenseur (G1S10240), puis il arrive sous forme liquide dans le détendeur (G1S10240)

Il indique que le fluide sous forme liquide est détendu dans le détendeur (G1S10240). Il ne sait pas par quel mécanisme il est détendu, il suppose qu'il est détendu par un système capillaire. (G1S10240)

Il indique qu'à l'entrée de l'évaporateur, le fluide commence à s'évaporer (G1S10240) et qu'au milieu de l'évaporateur, il n'est plus que vapeur (G1S10240)

Il précise que dans l'évaporateur, le fluide est à la même température que dans le condenseur, mais il n'est pas à la même pression. (G1S10240). Il indique que le fluide est à zéro pression dans l'évaporateur et à 10 bars dans le condenseur. (G1S10240)

Il corrige à nouveau son collègue et indique que le fluide reste chaud jusqu'au détendeur. Ce n'est que dans le détendeur qu'il devient froid (G1S10264). Autrement dit, selon DL, lorsqu'on détend un fluide, on le refroidit. Il tente d'illustrer le phénomène en donnant l'exemple d'une bouteille qu'on met sous pression, mais son explication est confuse :

« C'est quand il se détend (sous-entendu qu'il refroidit), maintenant tu mets une bouteille sous pression, tu vas voir si c'est pas froid, même de l'air hein ! » (G1S10266) « Tu mets une pression à 10 bar, tu mets une sortie comme ça, tu vas voir, ça va être gelé autour, si ça va sortir c'est la heu... » (G1S10268)

5.4.2. L'application du modèle de la situation connue à la situation nouvelle :

Dans un premier temps, DL tente de comprendre le fonctionnement de la canette à partir des données de l'article où il note qu'il y a du vide et une valve.

Il tente d'expliquer le fonctionnement de la canette en mobilisant l'état sous vide. Il pense qu'à l'ouverture de la valve, le vide aspire. Il ne précise pas de quel côté l'aspiration a lieu (G1S10352). Il estime, que lorsqu'il y a aspiration, l'air entre dans le vide. (G1S10357). Il pense qu'un dispositif sous vide agit comme un détendeur. (G1S10357). D'après lui, ce mécanisme provoque l'évaporation du liquide. (G1S10357). Il explique que lorsqu'il y a une aspiration par une petite ouverture, cela crée du froid. (G1S10357).

« Ça va mettre de l'air dans le truc sous vide, et, comment, avec l'air, en fait quand l'air va arriver dans un truc sous vide c'est comme un détendeur. Si tu veux quand t'as, quand un détendeur, quand ça va, ça s'ouvre, quand le heu, le liquide s'évapore, il fait froid, là c'est pareil, quand tu ouvres un truc sous vide, ça aspire de l'air, ça va créer du froid avec une petite ouverture, ça va créer le froid (G1S10357)

Il pense qu'à l'ouverture de la valve, l'eau de l'échangeur, qui est chaude, descend dans le dessicant. (G1S10429)

DL, comme l'ensemble de ses collègues, tente de comprendre le fonctionnement du système de la canette, dans la position inverse de son utilisation. Cette position est suggérée par le schéma fourni dans l'article dont ils disposent au départ. C'est ce qui induit l'idée que l'eau de l'échangeur descend dans la cavité du dessicant. Il ne parle pas de vapeur. Il parle d'eau chaude.

Pour DL la détente s'explique par l'existence d'air dans le dessicant qui est aspiré par le vide dans l'échangeur. Pour DL, l'air qui arrive dans le vide agit comme un détendeur. (G1S10429)

Son collègue BN conteste cette hypothèse. Il lui affirme qu'il n'y a pas d'air dans la canette.

BN : ah si, c'est sous vide déjà, à mon avis les deux enceintes sont sous vide, donc il n'y a pas d'air. (G1S10434)

BN : il y a marqué « une boisson se refroidit par un échangeur thermique qui contient 1cl d'eau sous vide » (G1S10436)

BN : il n'y a pas d'air (G1S10438)

Tout le temps, il raisonne en termes d'aspiration et de détente. Sa pensée est dominée par ce mécanisme.

Dans ses énoncés on constate qu'il tente d'assimiler la canette à un petit réfrigérateur. Il cherche les composants du réfrigérateur dans la canette.

5.4.3. La valve est un détendeur :

Il pense avoir trouvé la solution.

« Ah non ça y est, j'ai trouvé comment ça marche. Je crois avoir trouvé. Là c'est sous vide. Là on a l'échangeur sous vide regarde hop. Toc. Là c'est l'échangeur. Donc là on a de l'eau. Voilà. Lorsque l'eau est à température du liquide qui est autour. Voilà. Lorsqu'on ouvre ici le détendeur. Le compteur. L'air qui rentre » (G1S10437)

On note qu'il désigne du doigt sur le schéma de la canette la valve comme le détendeur.

Il assimile le dessicant à un condenseur. Comme le condenseur du réfrigérateur, le dessicant transforme la vapeur en liquide.

Il finit par identifier trois composants du réfrigérateur dans la canette :

« [...] on a un condenseur, on a un évaporateur, on a un détendeur » (G1S10613).

« Un détendeur, un évaporateur, un condenseur » (G1S10840)

La valve est toujours assimilée à un détendeur. L'échangeur thermique de la canette est l'évaporateur et le dessicant le condenseur.

Lors de la deuxième séance, DL continue inlassablement à assimiler l'échangeur thermique de la canette, le dessicant et la valve aux composants du réfrigérateur (G1S20287) (G1S20299)

Il affirme à nouveau que la valve est un détendeur. (G120547- S20547 - G1S20616)

Ses collègues qui le jugent plus compétents qu'eux dans le domaine le suivent. Ils adoptent son langage et tentent d'assimiler le dispositif technique de la canette au modèle qu'il leur propose.

Le test de son hypothèse sur la canette ne leur paraît pas cohérent.

L'assimilation de la valve à un détendeur est remise en question par ses collègues.

Un long débat à propos de la valve s'engage dans le groupe. Les élèves apportent beaucoup de précision sur la nature et la fonction d'une valve en général et de la valve de la canette en particulier.

Face aux réactions de ses collègues, notamment de BN, il commence à dissocier les composants des fonctions qu'ils remplissent.

DL : moi je mettrais détendeur entre parenthèse en 3 (G1S20614)

Dans cette réaction, on note un début de remise en question de l'assimilation de la valve à un détendeur, mais pas pour longtemps. Il revient à nouveau à la charge, malgré les arguments apportés par ses collègues.

« Pour moi c'est (la valve) un détendeur, je ne sais pas dans quel sens, mais c'est un détendeur » (G1S20616)

5.4.4. De la valve conçue comme un détendeur au concept de détente :

La confrontation aux points de vue contradictoires de ses collègues, le conduit progressivement à distinguer le détendeur : le composant, de la fonction qu'il remplit : la détente :

« Non, non le détendeur, c'est le phénomène de détente, la valve c'est un système » (G1S20619)

Il renonce à la recherche d'un composant analogue au détendeur de l'échangeur du réfrigérateur, et se limite à la fonction : la détente. (G1S20619)

Il estime que la valve fait fonction de détendeur et qu'il faut retenir le principe de la détente. (G1S20621). Mais il ne renonce pas totalement à son point de vue, il le module. Le débat avec ses collègues reprend à nouveau sur le principe de la détente et sur le rôle de la valve dans ce phénomène.

Suite aux recherches effectuées sur le détendeur et la détente, son collègue BN lui explique

BN : « oui c'est sur un circuit hydraulique. Page 174 à 173. » (G1S20863)

BN : « un détendeur de pression » (G1S20863)

BN : « voilà c'est un détendeur » (G1S20863)

BN : « un détendeur est un appareil de précision à placer dans un circuit gazeux ou liquide,

Le détendeur permet de ramener une pression amont initiale, fréquemment instable à une pression aval plus réduite et devant rester rigoureusement stable. » (GIS20863)

BN : « donc en gros c'est détendre un gaz ou un liquide qui a une certaine pression » (GIS20863)

BN : « c'est casser la pression » (GIS20863)

BN : « c'est réduire sa pression. » (GIS20863)

BN : « Mais là en fait notre valve ne joue pas le rôle » (GIS20863)

BN : « c'est pas un détendeur. » (GIS20863)

BN : « On n'a pas besoin de détente » (GIS20863)

BN : « conteste au début l'idée d'existence d'une détente dans la canette. »

MC : « c'est grâce à la détente » (GIS20864)

Il renonce à la recherche d'un détendeur, pour ne retenir que le phénomène de détente. Il passe du composant « détendeur » au concept de « détente ».

5.4.6. Du concept de détente à celui de dépression :

Avec l'aide de son collègue BN, il convertit rapidement la détente en un jeu de pression et admet que la détente c'est la dépression

LD : non t'as une différence de pression (GIS20866)

BN : parce que ce n'est pas une détente au sens propre, (GIS20871)

BN : c'est pas un détendeur au sens propre, GIS20871

BN : un détendeur c'est en amont GIS20871

BN : t'as un fluide ou un gaz qui est à une pression élevée GIS20871

BN : quand tu ouvres ta valve, ça crée un équilibre (GIS20877)

BN : t'as une détente qui se fait, parce que ton gaz est comprimé (GIS20877)

BN : ton gaz comprimé se détend. (GIS20877)

BN : Mais ta valve n'est pas un détendeur. Je ne pense pas. (GIS20877)

LD : ça permet justement de, de (GIS20878)

BN : oui c'est (GIS20879)

LD : créer l'équilibre (GIS20880)

BN : voilà. Mais, c'est pas un détendeur. On est d'accord ? (GIS20881)

BN : Le fonctionnement d'un détendeur n'a aucun rapport avec la canette ça. (GIS20883)

BN : il n'y a pas de rapport direct. ((GIS20883)

BN : il ne faut pas confondre, (GIS20883)

BN : pour le détendeur et il y a le gaz qui se détend. (GIS20883)

BN : le détendeur, ça serait comme si tu voudrais, (GIS20887)

BN : admettons t'as ton gaz à haute pression tu veux la ramener à une pression un peu inférieure en dessous (GIS20887)

BN : mais tu veux contrôler cette détente. (GIS20887)

BN : Le détendeur c'est comme si tu voudrais définir une pression dans ton compartiment inférieur. (GIS20887)

Le détendeur est compris comme un instrument de précision qui règle la pression quand elle varie.

BN : On dit on a un phénomène de détente et non pas un détendeur. (GIS20895)

BN : on n'a pas un appareil qui s'appelle le détendeur. (GIS20897)

À la troisième séance, BN reprend l'expérience de la seringue et lui fait la démonstration que la dépression provoque une vaporisation de l'eau.

BN : parce que si on prend mécaniquement tu prends une seringue tu mets de l'eau dedans tu as une dépression dedans t'as l'ébullition de ton eau. (GIS30167)

Suite à ces précisions, DL rejoint BN et les autres collègues, et admet que c'est une dépression qui provoque l'évaporation et non une détente. Il se démarque de l'approche du technicien centrée sur les fonctions des composants, et s'intéresse au phénomène de l'évaporation dans les deux situations, l'ancienne et la nouvelle. Mais on reste au niveau de l'hypothèse. Cette hypothèse va se vérifier lors de la consultation des brevets et du diagramme de phase.

DL rejoint le groupe à ce moment et continue à travailler sur la conception de l'objet.

Ce n'est qu'à la quatrième séance que les élèves vont comprendre que le système ne peut fonctionner que dans la position inverse de la canette (G1S40202 à G1S40209).

Il accède aux Brevets de Thermagen sur le site de l'INPI. Il note, à la lecture d'un brevet déposé de la canette, que le liquide réfrigérant s'évapore sous l'effet d'une dépression (G1S40350).

Il a des difficultés à comprendre la dépression. (G1S40350). Il lit qu'il y a une dépression. Il l'admet sans l'expliquer. Il n'y a aucun énoncé où il explique comment la dépression se produit. (G1S40350)

Il tente de comprendre comment on a fabriqué la canette, comment on a introduit l'eau, la boisson et le dessicant et comment ils ont monté la valve avec la tige dans l'espoir de comprendre grâce à ce montage son fonctionnement (G1S40423). C'est l'approche du technicien pur, qui tente de comprendre le fonctionnement de l'objet à partir de sa géométrie et de la manière dont il a été fabriqué. Bien entendu, dans le cas de cet objet en particulier, la connaissance de la géométrie n'est pas suffisante. Il a accédé à l'approche par les concepts, sans renoncer totalement à son approche de technicien. On note que son approche de technicien revient à nouveau.

6. Analyse du groupe 2 : L'apprentissage par le texte

Dans ce groupe, l'apprentissage d'une situation nouvelle se fait exclusivement par le texte. Les élèves de ce groupe n'ont aucun modèle pour les guider.

Leurs cheminements individuels sont très différents. Ils se croisent par moments sur une question particulière, font un petit bout chemin ensemble puis chacun reprend son cheminement personnel. Comme nous le verrons plus loin avec les 2 élèves que nous avons choisi de présenter PA et DM, on note que souvent ils n'ont pas la même préoccupation au même moment.

Les élèves de ce groupe ont fait l'effort de comprendre le fonctionnement de la canette et d'apprendre simultanément les concepts thermodynamiques qui portent sur les phénomènes en jeu dans ce fonctionnement.

Faute de modèle d'une situation connue, ils donnent priorité à l'apprentissage des concepts. Ils recensent dans le texte de l'article les concepts à définir et cherchent leurs définitions dans les dictionnaires usuels. La définition de certains concepts fait apparaître des concepts non évoqués dans ce texte ils tentent de les définir à leur tour. Par exemple les définitions de chaleur et de calories font apparaître le concept d'énergie.

Ils tentent d'abord de prendre en compte l'ensemble des informations données dans le texte de l'article. Cette démarche n'a pas été concluante Ils ont alors découpé l'ensemble du texte en segments. Pour les comprendre, ils s'arrêtent à des mots isolés ou à des notions. Après avoir défini les concepts, ils tentent de les exemplifier dans la situation nouvelle.

Aucun élève de ce groupe ne dispose de connaissances suffisantes dans le domaine pour comprendre tous les concepts fournis par les textes.

La définition des concepts se poursuit avec l'accès à la documentation technique et scientifique, qui leur fournit d'autres concepts.

Dans leur démarche, ils élaborent des hypothèses partielles et locales à partir des faits établis. Ce sont des hypothèses conjoncturelles.

On constate aussi que le parcours des élèves de ce groupe est chaotique. Ils passent d'un concept à l'autre, d'un phénomène à l'autre, et d'un processus local à l'autre. Certaines hypothèses élaborées à une séance, qui débouchent sur une impasse ou qui rencontrent une contradiction ne donnant pas lieu à une construction, sont abandonnées. Ces hypothèses reviennent à une autre séance. Ce parcours chaotique rend difficile l'établissement d'une genèse de leurs constructions.

PA et DM vont construire les deux concepts principaux en jeu dans la canette : l'adsorption et l'évaporation. Ils n'arriveront pas à comprendre le transfert thermique tel qu'il est conçu en thermodynamique et encore moins à comprendre le phénomène qu'il désigne dans la canette. Ils vont expliquer des séquences du fonctionnement de la canette en mobilisant ces concepts dans la canette. Dans cette explication, ils vont combiner les concepts acquis à des conceptions quotidiennes.

Aucun élève de ce groupe n'est parvenu à concevoir le fonctionnement global de la canette.

6.1. Construction des concepts chez PA :

PA se rend compte que pour comprendre les informations fournies par le texte qui l'informent sur les phénomènes dans la canette, elle doit d'abord définir ces concepts (G2S11100) (G2S11098 - G2S11102). La majeure partie des séances est consacrée à la définition de mots issus du texte.

6.1.1. Le concept d'adsorption :

6.1.1.1. Étape 1 :

Pour PA, l'adsorption est un terme nouveau. Elle se demande si ce terme existe (G2S10054). Elle aborde dans un premier temps ce concept à partir des définitions données dans des dictionnaires usuels. Elle retient que l'adsorption est une propriété du dessicant qui consiste à capter l'humidité et à la fixer à la surface de son corps (G2S10065)

Son collègue FG décrit la structure de cette matière comme étant constituée de « petits » orifices où viennent se loger les petites gouttes « à la surface mais sans pénétrer son corps » (G2S10086).

Elle note que le phénomène d'adsorption est lié à cette matière nommée « dessicant » qu'elle ne connaît pas non plus. L'article décrit le dessicant utilisé dans la canette comme une « céramique technique ». Ses collègues lui précisent que cette matière se présente dans le commerce sous forme de petites billes conditionnées dans des sachets pour lutter contre l'humidité (G2S10109 - G2S10112). Elle note cette information (G2S10110). Elle retient que c'est une matière proche de l'argile qui correspond à une céramique technique dont les propriétés précises lui échappent (G2S20515). Elle tente de comprendre la propriété du dessicant en la rapprochant de celle de l'argile (G2S10237) (G2S10243) ou de celle de la terre cuite dont parle l'article (G2S10239) (G2S10241).

PA distingue bien l'adsorption de l'absorption (G2S10052 - G2S10056). Elle note la différence entre ces deux concepts : l'absorption est une pénétration profonde dans le corps de la matière (G2S10094) et l'adsorption est une pénétration superficielle.

Dans un premier temps PA se suffit de cette définition minimale de l'adsorption parce que la documentation dont elle dispose à cette étape ne lui fournit pas d'informations plus précises.

Tout le long de cette première étape PA se demande, comment le dessicant peut capter l'humidité et la retenir prisonnière à sa surface, d'une part, et comment le phénomène de l'adsorption participe au processus de réfrigération, d'autre part.

6.1.1.2. Étape 2 :

Avec la documentation technique et scientifique, elle découvre qu'il existe plusieurs types de dessicant (G2S30726 - G2S30731). Elle découvre également qu'un dessicant a une structure alvéolaire. Le texte qui décrit cette structure est accompagné d'un schéma qui l'aide à se construire une représentation plus précise de cette matière.

Pour le phénomène d'adsorption, elle découvre qu'il existe deux processus : un processus physique (physisorption) et un processus chimique (chimisorption) (G2S30715). Plusieurs de ses énoncés (G2S30715 à G2S30733) indiquent qu'elle a compris qu'il s'agit

dans la canette du processus : la physisorption. Elle apprend que ce processus est le fait des forces de van der Waals. Elle note que dans ce processus intervient un phénomène électrostatique qui permet aux molécules du dessiccant d'attirer les molécules de l'eau. Dans ce phénomène, les pôles des molécules chargées positivement attirent les pôles de molécules chargées négativement. Par ce processus, les molécules de l'eau sont maintenues attachées aux molécules du dessiccant (G2S30717 - G2S30719). Elle note que ce phénomène se produit sans transformation des molécules (G2S30724). La définition de l'adsorption donnée dans la documentation technique et scientifique lui semble plus précise (G2S30753) et lui permet de comprendre comment l'humidité est capturée et piégée dans la canette, dans les alvéoles du dessiccant. Autrement dit, elle comprend le concept d'adsorption et comment elle s'effectue dans la canette. PA a ainsi construit le concept opératoire d'adsorption.

6.1.2. Les concepts d'évaporation et de changement de phase chez PA :

La construction de ces concepts se réalise, en gros, en trois étapes :

6.1.2.1. Étape 1 :

Au départ, PA aborde l'évaporation de l'eau dans la canette avec une conception de l'évaporation de ce fluide issue de son expérience quotidienne. Dans cette conception, l'évaporation de l'eau est liée à l'apport de chaleur et se produit lorsque la température de ce fluide atteint 100°. La relation établie entre l'apport de chaleur et l'évaporation est le fait de l'observation de ce phénomène dans une situation quotidienne. Pour évaporer de l'eau, on lui apporte de la chaleur. Cette relation est aussi transmise par la culture notamment scolaire⁵⁷.

C'est avec cette conception de l'évaporation qu'elle va aborder ce phénomène dans la canette.

La confrontation à la situation remet en question sa conception initiale de l'évaporation.

Elle note d'abord que l'évaporation se produit dans la canette à une température ambiante, donc à basse température, et non à 100°. « *Sous vide, on peut faire bouillir de l'eau à 0°* ». Cette information est en contradiction avec sa conception de l'évaporation.

Elle note dans un passage du texte que l'évaporation se fait sous vide, et dans un autre, sous basse pression. L'évaporation sous vide et sous basse pression lui paraissent contradictoires. L'origine de cette contradiction est sa conception du vide. Celui-ci est conçu comme une absence totale de pression (G2S11028).

57 - Personne ne s'amuse à contrôler dans sa cuisine la température de l'eau lorsqu'elle s'évapore. A part le physicien qui précise que cette température d'évaporation à 100° de l'eau n'est valable qu'au niveau de la mer, tout le monde est d'accord sur le fait que dans la situation habituelle l'eau s'évapore à 100°, sans l'avoir jamais vérifié. C'est une connaissance transmise par la culture, notamment scolaire.

Elle va chercher longtemps à comprendre comment la mise sous vide de l'eau provoque l'évaporation.

Elle fait l'hypothèse que lorsque l'eau est mise sous vide, son évaporation nécessitera moins d'énergie. Autrement dit, dans cette hypothèse, l'évaporation de l'eau sous vide est liée à la quantité d'énergie qu'on lui apporte (G2S20768).

Ce n'est qu'à partir de la 2^e séance qu'elle avance l'hypothèse que le vide n'est pas total dans la canette et qu'il correspond à une basse pression. Cette hypothèse sera confirmée par la suite par l'enseignante et les brevets.

6.1.2.2. Étape 2 :

L'enseignante, constatant la difficulté des élèves de ce groupe à comprendre comment l'évaporation se produit décide d'intervenir par un questionnement pour les aider. Dans ce questionnement elle a recours à une analogie proportionnelle⁵⁸. Elle se sert de la situation connue par tous, celle de la casserole d'eau sur le feu dans une cuisine. Cette situation joue dans cette analogie le rôle de la situation source. Dans celle-ci elle amène les élèves à établir un rapport entre la pression et la température. La situation cible est celle de la canette. Dans cette situation, la température est connue : c'est la température ambiante. Il s'agit d'inférer la pression, qui est l'inconnue, à partir du rapport existant entre la pression et la température dans la situation connue (G2S20769 - G2S20781).

ENS : Quand vous faites bouillir de l'eau dans une casserole et qu'elle s'évapore c'est sous quelles conditions ?

DST : 100°

ENS : à quelle pression ?

TOUS : atmosphérique

ENS : quelle est la température de votre échangeur ?

GN : ambiante (18°-20°)

ENS : à la pression atmosphérique ?

PA : il faut une basse pression

Par cette analogie PA prend conscience de deux faits :

- La chaleur et la température ne sont pas les seules variables qui interviennent dans l'évaporation, il y a aussi la pression ;

58 - Dans l'analogie proportionnelle, on dispose généralement de trois termes (a, b, c) qui sont donnés dont deux termes a et b qui sont définis dans un rapport (a/b). Il s'agit de trouver le 4^eme terme qui serait dans un rapport avec le terme c, analogue au rapport qu'à a avec b.

- Une relation d'interdépendance existe entre la pression et la température dans l'évaporation.

Elle transforme sa conception initiale : l'évaporation se produit à une température de 100° et à une pression atmosphérique. Elle infère que dans la canette, l'évaporation se produit à pression basse et à température ambiante. Le concept d'évaporation obtient un sens chez PA par ces deux situations différentes.

Elle énonce à sa manière le concept : « *un changement (de phase) se fait à une pression donnée et à une température correspondante.* »

Dans sa conception de départ, elle prenait en compte uniquement l'apport de chaleur. Elle savait que l'ébullition de l'eau se fait en général à une température de 100. Elle ne tenait pas compte de l'intervention de la pression dans ce phénomène. Elle apprend lors de cet échange avec l'enseignante que la pression intervient dans l'évaporation. C'est la première transformation de sa connaissance de départ.

De plus, sa conception initiale n'était valable que pour le cas de la situation habituelle. Elle vient d'apprendre que dans la nouvelle situation, les valeurs de la pression et de la température ne sont pas les mêmes. Elle infère que lorsque la température change, la pression la suit. Elle vient d'apprendre que ces deux variables sont dépendantes réciproquement l'une de l'autre dans l'évaporation. Autrement dit, elle vient de construire le couple pression-température sans le formuler.

La situation nouvelle a contribué à la construction de la relation particulière qui lie la température à la pression.

PA retient que « l'évaporation se fait à pression et à température constante » dans une situation déterminée.

6.1.2.3. Étape 3 :

Dans sa conception initiale, PA lie l'évaporation à l'apport de la chaleur. PA n'a pas renoncé à la relation entre la chaleur et l'évaporation, puisque aucune information ne l'a remise en question, mais elle ne sait pas comment la placer dans la nouvelle connaissance acquise. C'est à la 3^e séance qu'un texte théorique lui permet de faire le lien entre les conditions de pression et de température et l'apport de la chaleur dans l'évaporation, et d'énoncer le concept complet de l'évaporation :

« [...] le passage de l'eau à l'état de **vapeur** demande une quantité **d'énergie** sous forme thermique » et « pour une **température** donnée le passage d'un état à un autre ne peut se faire qu'à une **pression** en fonction de cette **température** » (G2S30187)

Dans ce concept, elle conçoit que le couple pression-température constitue les conditions nécessaires et non suffisantes de l'évaporation.

Dans l'énoncé suivant, elle formule ces conditions nécessaires :

« [...] Alors pour une **température** donnée le passage d'un état à un autre ne peut se faire qu'à une **pression** en fonction de la **température**... » (G2S30207)

Elle considère que dans ces conditions le facteur déclenchant du phénomène est l'apport de chaleur :

« [...] dernier point c'était le passage de l'état liquide à l'état **vapeur** demande une quantité d'**énergie** sous forme thermique [...] » (G2S30224)

Elle introduit l'apport de chaleur dans la production du phénomène. Elle énonce le concept complet d'évaporation : « la vaporisation se fait à une température donnée et une pression donnée correspondante par un apport de chaleur ».

PA est arrivée à acquérir le concept de vaporisation. Ce concept correspond à un concept opératoire puisque PA est capable de l'utiliser pour expliquer l'évaporation dans cette situation nouvelle. Les deux situations évoquées dans l'analogie confèrent un sens au concept d'évaporation. Ce concept opère bien dans les deux situations. De plus, la forme opératoire du concept acquis se double de sa forme prédicative puisque PA formule correctement la définition de ce concept.

PA a aussi compris sa généralisation à tous les changements de phase.

6.2. Conception de l'objet technique chez PA

Elle fait plusieurs lectures de l'article. Bon nombre de ses énoncés sont de simples énoncés de texte. Elle n'exprime pas souvent l'interprétation qu'elle fait des passages des textes qu'elle énonce. Probablement parce qu'elle a des difficultés à les comprendre.

PA élabore des hypothèses sur le fonctionnement de la canette à partir de passages du texte sur lesquels elle se focalise à un moment donné. Chaque hypothèse est élaborée à partir d'un passage du texte et porte sur une séquence isolée du système. À partir des hypothèses partielles, elle tente de temps en temps une hypothèse globale. Celle-ci est au départ trop vague, trop générale et ne donne pas d'explications précises sur les phénomènes considérés.

6.2.1. Premières hypothèses partielles et générales qui abordent la réfrigération par l'adsorption :

Elle se demande dans un premier temps si la boisson est constamment fraîche ou si elle ne commence à se rafraîchir qu'après l'ouverture de la valve. Elle commence par deux hypothèses alternatives sur le rafraîchissement de la boisson. Dans le premier cas, elle suppose que les calories sont captées de la boisson en permanence. Dans ce cas, elle estime que la boisson est constamment fraîche. Dans le second cas, elle suppose que la boisson ne se rafraîchit qu'après l'ouverture de la valve (G2S10546).

Ses collègues FG (G2S10547) et GN (G2S10548) lui répondent que la boisson ne commence à se rafraîchir qu'à partir de l'ouverture de la valve.

Influencée par le texte de l'article qui met l'accent sur le rôle du dessiccant dans le processus de réfrigération, elle aborde le fonctionnement de la canette par l'ad sorption. Elle considère que l'élément le plus important dans le processus est l'adsorption des calories (G2S10742 – G2S10744 – G2S10745 – G2S10746). Ce texte ne lui précise pas si les calories sont ad sorbées avant ou après l'ouverture de la valve. Elle élabore une hypothèse partielle qui ne tient compte que de l'ad sorption. Dans cette hypothèse partielle, elle suppose que les calories sont ad sorbées au moment de l'ouverture de la valve (G2S10562).

Ouverture de la valve (action) -> adsorption des calories (transformation)
(G2S10562)

Dans une autre hypothèse partielle, elle considère que les calories vont suivre la vapeur (G2S10675). Celle-ci complète la précédente (G2S10562). Dans la première hypothèse ce sont les calories qui sont adsorbées. Dans la deuxième hypothèse, la vapeur est adsorbée et les calories la suivent.

Adsorption de la vapeur -> adsorption des calories

6.2.2. Des hypothèses partielles et générales sur l'évaporation :

PA estime qu'il y a deux étapes dans le processus : la première c'est l'ab sorption des calories par l'eau sous vide (G2S10749), la seconde c'est la vaporisation (G2S10751). "L'ab sorption des calories par l'eau" est une expression qu'elle va utiliser souvent. Elle entend par ab sorption des calories leur extraction à la boisson, pour employer les termes de l'article.

Elle élabore une série d'hypothèses partielles sur l'évaporation.

L'hypothèse d'un équilibre thermique entre la boisson et l'eau de l'échangeur avant l'ouverture de la valve (G2S10568). Cette hypothèse est admise par ses collègues.

Les autres hypothèses qu'elle propose sont les suivantes :

- le contact thermique, entre la boisson et l'eau de l'échangeur, est établi au moment où on met la boisson dans la canette (G2S10769). Cette hypothèse ne reçoit pas d'avis de la part de ses collègues

- Avant l'ouverture de la valve, l'eau est déjà à l'état vapeur (G2S10778) et il n'y a plus d'eau sous forme liquide (G2S10782). FG est de son avis pour cette hypothèse.

- Les calories sont extraites par l'eau dès la mise de la boisson dans la canette, avant l'ouverture de la valve (G2S10804). Cette hypothèse ne reçoit pas non plus d'avis de la part de ses collègues

On note que son hypothèse reçoit une réponse uniquement lorsque son contenu croise l'intérêt du moment de ses collègues.

6.2.3. Des hypothèses partielles à une hypothèse globale et générale sur la réfrigération :

Elle reprend plusieurs hypothèses partielles et les combine dans une seule explication :

Hypothèse 1 (G2S10562) : ouverture de la valve → adsorption des calories

Hypothèse 2 (G2S10572) : Evaporation sous basse pression → Extraction des calories

Hypothèse 3 (G2S10675) : Adsorption de la vapeur → adsorption des calories

Hypothèse 4 (G2S10749) : eau sous vide → extraction des calories

Hypothèse 5 (G2S10769) : Mise de la boisson dans la canette → l'eau liquide s'évapore

Par une mise en intrigue, elle tente de reconstituer le fonctionnement global de la canette dans une hypothèse globale.

L'enchaînement des épisodes de cette intrigue est :

Eau sous vide + Mise de la boisson dans la canette → calories extraites → transformation du liquide en vapeur + ouverture de la valve → adsorption de la vapeur → adsorption des calories

Énoncé de son hypothèse globale :

*[...] Au début tu as ton eau **sous vide**, après ils doivent mettre la boisson peut-être dedans, c'est à ce moment que tes **calories**, elles sont extraites, et que ton, eau **liquide** se transforme peut-être en **vapeur** d'eau, Et au moment où tu appuies sur la **valve**, c'est là où ta **vapeur** d'eau, elle est adsorbée par ton **dessicant** et tes **calories** sont ... (G2S10825)*

On peut noter que la plupart des éléments qui constituent son hypothèse sont empruntés au texte de l'article : « l'eau sous vide », « l'extraction des calories », « l'évaporation de l'eau sous vide », « l'adsorption de la vapeur par le dessicant ». C'est en partant de ces données qu'elle procède à l'élaboration de cette hypothèse globale.

À ce moment, PA distingue l'eau sous vide de l'eau sous basse pression. Elle n'a pas encore construit les conditions d'évaporation. Elle n'a pas encore compris le processus de transfert thermique et d'adsorption. Son hypothèse s'apparente à une spéculation sur des phénomènes qu'elle n'a pas encore conceptualisés.

Dans cette hypothèse, elle établit des relations entre un état de l'eau (sous vide), trois phénomènes, (extraction des calories, évaporation, adsorption), deux actions, (mise de la boisson dans la canette, ouverture de la valve).

Elle applique cette hypothèse globale à la canette. La situation lui répond. Une contradiction lui apparaît. Celle-ci porte sur le moment du rafraîchissement de la boisson. PA considère que si toutes les calories sont absorbées au départ, la boisson doit être froide. Elle estime dans ce cas que si la boisson est rafraîchie, quel est l'intérêt d'ouvrir la valve ? (G2S10831). Elle note que son hypothèse ne concorde pas avec la situation nouvelle comme le texte de l'article la rapporte. Son hypothèse est remise en question.

PA doute de la validité de son hypothèse, mais elle ne la rejette pas totalement. Elle va réapparaître sous une forme modifiée à la 4^e séance. La remise en question de l'hypothèse ne porte en fait que sur une de ses propositions. Elle retient pour le moment que l'eau se transforme en vapeur lorsque les calories sont extraites (G2S10839). Elle ne sait pas à quel moment ce phénomène se produit ni comment.

La remise en question de son hypothèse engendre une série de questions :

Quel est le principe de la pompe à vapeur ? G2S10940

Comment refroidir la boisson ? G2S10915

Une série d'interactions s'engage avec ses collègues à propos de la pompe à vapeur et son rôle dans le processus de réfrigération.

Elle estime que le phénomène de vaporisation précède celui du pompage de la vapeur. Elle suggère à ses collègues de chercher d'abord à comprendre comment l'eau se transforme en vapeur (G2S20973-- G2S20976).

Elle pense aussi que tous les phénomènes en jeu dans la canette sont liés (G2S20984). Mais elle estime qu'il faut les traiter séparément (G2S20993).

Elle consacre une grande partie de son activité lors de la deuxième et la troisième séance à la collecte de documents scientifiques et techniques et à étudier les concepts.

6.2.4. Le transfert thermique par aspiration de la vapeur : le dessicant joue le rôle d'une pompe à vapeur qui aspire la vapeur

Le concept de pompe admet deux fonctions contradictoires : l'aspiration et le refoulement. Depuis la 1^e séance PA ne retient que la fonction d'aspiration pour concevoir le transfert thermique de l'échangeur vers le dessicant (G2S10209). L'eau, sous forme liquide ou vapeur, est aspirée par le dessicant qui l'adsorbe. L'article mentionne que : « le dessicant agit comme une pompe à vapeur » et que, par ce pompage, « la vapeur d'eau est adsorbée », ce qui permet de “déplacer” les calories « vers le fond de la canette », dans le dessicant.

Ces informations permettent à PA de concevoir le transfert thermique de l'échangeur vers le dessicant en termes de déplacement de la vapeur grâce à cette fonction du dessicant qui agit comme une pompe à vapeur aspirante (G2S10223 - G2S20565 - G2S20566). Dans cette conception de PA, le dessicant est le seul élément impliqué dans le transfert thermique. L'hypothèse chez PA d'un transfert thermique par aspiration s'appuie sur la conception de l'adsorption comme une propriété du dessicant qui consiste à « attirer », à « aspirer » l'humidité. Comme le processus d'adsorption n'est pas clair pour les élèves de ce groupe, ils l'ont abordé par cette notion de pompage de la vapeur. Ils ont passé une grande partie de la 2^e séance à étudier cette notion de pompage et le principe d'une pompe à vapeur.

6.2.5. Le transfert thermique par refoulement de la vapeur : l'échangeur thermique est une machine à vapeur qui refoule ou pousse la vapeur

À la 3^e séance, les élèves recueillent des informations techniques et théoriques précises. Ils notent qu'une dépression se produit à l'ouverture de la valve (DM-G2S30410 – PA G2S30415).

Cette nouvelle information remet en question l'hypothèse de départ de PA (G2S10209) d'un transfert thermique par aspiration de la vapeur par le dessicant, assimilé à une pompe à vapeur qui aspire. Suite à cette nouvelle information, PA marque une hésitation, elle ne sait plus si l'aspiration est le fait du dessicant ou de la dépression. Elle exprime cette hésitation sous forme d'une question adressée à son collègue DM (G2S10209).

DM lui précise que le dessicant ne peut adsorber que l'humidité qui est à sa proximité (DM-G2S30530). Il faut donc lui acheminer le fluide à proximité pour qu'il puisse l'adsorber.

Dans le cas d'une évaporation totale de l'eau, la différence de pression entre les deux cavités peut expliquer le transfert thermique et l'adsorption par la dépression.

PA note dans un texte l'existence d'un état diphasique possible avant l'ouverture de la valve (G2S30255). Cette information va résoudre son problème du moment de l'évaporation. Elle lui permet d'envisager une évaporation avant et après l'ouverture de la valve. Mais elle lui pose un problème au niveau du transfert thermique.

Tous les textes indiquent que l'échange thermique entre l'échangeur et le dessicant se fait par le transfert de la vapeur.

PA, comme ses collègues, aborde la canette dans sa position inversée de fonctionnement. Aborder la canette dans cette position est contre-intuitif : la vapeur monte, elle ne descend pas. De plus, dans cette position, l'eau liquide fait obstacle à la vapeur produite comme l'indique le schéma ci-dessous.

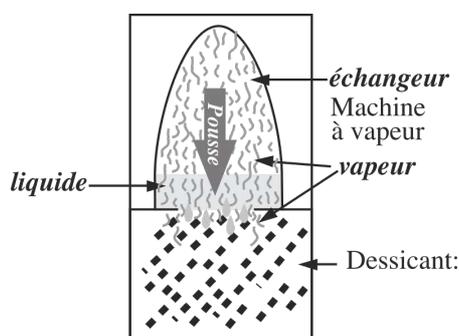


Figure 21. Représentation de l'échange thermique par refoulement de la vapeur

Pour trouver une solution à ce transfert de la vapeur dans le dessicant dans cette position inversée de la canette, PA élabore une hypothèse dans laquelle elle conçoit que la vapeur produite dans l'échangeur exerce une poussée vers le bas qui entraîne l'eau liquide et la vapeur (G2S30428) vers le compartiment du dessicant. (G2S30431). Pour justifier son point de vue elle fait appel à ce qu'elle a appris sur les machines à vapeur.

Dans cette perspective c'est l'échangeur thermique qui joue le rôle de machine à vapeur. Pour assoir son hypothèse de pompage par refoulement, elle donne l'exemple de la chaudière qui lui semble le plus proche de la canette, parce que la poussée est exercée uniquement par la vapeur, tandis que dans les autres machines à vapeur qu'elle connaît, il y a toujours un piston :

*« Moi ce que j'ai trouvé c'est que le chaud ; enfin en gros, le but de la machine à **vapeur**, c'est de pousser l'eau (DST grâce à la **pression**) qui est contenue dans la **vapeur**. En fait, c'est pousser la **vapeur** et en même temps emmener l'eau, dans un autre compartiment » (G2S30422)*

« Oui c'est ça en fait, c'est que, c'est pousser vers le bas, on peut noter ça non pour la **pompe à vapeur** ? » (G2S30426)

« Que l'objectif est de pousser l'eau, enfin directement avec la **vapeur** non ? » (G2S30428)

« Oui voilà, non, l'eau en même temps que la **vapeur**. Dans la **vapeur** enfin, la **vapeur**, c'est de l'eau mais » (G2S30431)

« En fait là c'est marqué : la chaudière, ça pousse l'eau directement avec la **vapeur** contrairement à une autre **pompe**, qui utilise un piston » (G2S30433)

Cette hypothèse est en contradiction avec le fonctionnement du système. Mais PA n'en a pas conscience. Elle est aussi en contradiction avec le point de vue de son collègue DM qui lui fait remarquer qu'il n'est dit nulle part que le dessicant est une pompe à vapeur mais qu'il agit « comme » (G2S30414 - G2S30528). Dans le phénomène de la « pompe à vapeur », il évoque la différence de pression et la propriété du dessicant « d'attirer » la vapeur (G2S30528).

Lors de la quatrième séance, PA recueille plusieurs informations dans la documentation technique qui vont lui permettre de résoudre un certain nombre de problèmes.

Tout d'abord elle note que lorsqu'on appuie sur le bouton pour ouvrir la valve G2S40691, une dépression se produit G2S40694. Elle note également que l'ouverture de la valve produit deux effets :

- l'évaporation de l'eau liquide (G2S40689-G2S40691).
- une dépression, qui déplace la vapeur qui est aspirée ensuite par le dessicant (G2S40699).

6.2.5. Transfert thermique par la dépression :

PA découvre par la documentation technique, la position correcte de fonctionnement de la canette (G2S40377). Cette découverte résout le problème du passage de la vapeur à travers la barrière de l'eau : (G2S40603) la vapeur ne descend plus elle monte (G2S40625) et l'eau liquide ne constitue plus un obstacle à son passage. (cf. énoncés ci-dessus : G2S30426 - G2S30428 - G2S30431 - G2S30433)

La dépression qui se produit à l'ouverture de la valve provoque le déplacement de la vapeur qui monte (G2S40625). Sous l'effet de la dépression, la vapeur monte très vite entraînant avec elle des gouttelettes d'eau et de vapeur. Une espèce d'entonnoir les refait redescendre dans la cavité 2 (échangeur) (G2S40627).

Mais elle n'est pas en mesure de lier la vitesse de la vapeur à l'énergie cinétique. Elle la lie uniquement à l'effet de la dépression. (G2S40627)

Elle estime que lorsqu'on appuie sur le bouton (G2S40691), la dépression qui se produit (G2S40694, provoque une aspiration de la vapeur par le dessicant (G2S40699) et la vapeur acheminée à grande vitesse est adsorbée par le dessicant.

Au cours de cette séance, PA a quasiment construit le concept d'adsorption. Elle peut mieux expliquer le transfert thermique et l'adsorption. Dans l'explication du transfert thermique, elle n'évoque pas l'énergie cinétique. Dans l'adsorption, elle n'explique pas comment l'énergie thermique est stockée dans le dessicant.

6.2.6. L'évaporation par dépression :

PA aborde l'information sur l'évaporation par dépression à l'ouverture de la valve avec ses hypothèses de départ où elle suppose que l'évaporation est totale. Une nouvelle contradiction émerge. Elle considère que si l'évaporation se produit à l'ouverture de la valve, cela signifie que l'eau était à l'état liquide avant. Dans ce cas, elle se demande pourquoi l'eau demeure à l'état liquide puisqu'elle est sous vide (G2S40508 – G2S40510 - G2S40513).

Dans un document, elle découvre à nouveau qu'à la phase initiale l'eau est à l'état liquide et vapeur (G2S40685). Ce qui lui permet de résoudre le problème du moment de l'évaporation. Elle pensait avant que l'évaporation est totale et se produit soit avant soit après l'ouverture de la valve (G2S40684). Ces hypothèses étaient en contradiction avec les informations fournies par les textes dont certaines évoquaient une évaporation avant et d'autres la situaient après. L'état diphasique de l'eau lui permet d'envisager une évaporation partielle sous basse pression avant l'ouverture de la valve suite à l'échange thermique avec la boisson et une autre après l'ouverture de la valve par dépression (G2S40689 - G2S40691). Mais elle ne comprend pas comment la dépression intervient dans l'évaporation. Cette information lui semble en contradiction avec le concept d'évaporation qu'elle a construit.

6.2.7. Problèmes posés par la dépression dans la conception du fonctionnement de la canette :

Dans son hypothèse initiale à la première séance, elle soutenait que *« lors de la mise de la boisson dans la canette, les calories sont extraites à la boisson. Celles-ci provoquent une transformation de l'eau liquide en vapeur. La vapeur est ensuite adsorbée par le dessicant »* (G2S10562). Lors de cette séance, c'est le moment de l'extraction des calories qui

est remis en question. Elle avait noté que l'évaporation à ce moment est en contradiction avec la situation.

À la quatrième séance, elle estime que « *lors de la transformation de l'eau liquide en vapeur, il y a un rafraîchissement de la boisson, celle-ci a cédé sa chaleur à l'eau pour l'évaporer. Après on doit déplacer la vapeur qui a été transformée. Celle-ci est ensuite adsorbée par le dessicant.* » Elle s'interroge sur la raison du déplacement de la vapeur. L'évaporation, avant ou après, extrait la chaleur à la boisson. Le fait d'extraire la chaleur à la boisson refroidit celle-ci. Elle se demande pourquoi déplacer la vapeur, puisque la boisson est refroidie.

Elle ne trouve pas de réponse à sa question dans la documentation recueillie. Les réponses données par ses collègues ne lui paraissent pas convaincantes. Elle pose sa question à l'enseignante. Celle-ci lui renvoie sa question : « *tu te demandes pourquoi une fois qu'on a refroidi la boisson, on va s'embêter encore récupérer la vapeur* » ; « *réfléchissez à ce problème* ». Elle la renvoie à la documentation.

Il faut noter que les questions posées depuis la deuxième séance cherchent à expliquer le rôle du dessicant et de la pompe à vapeur dans le processus de refroidissement de la boisson. Expliquer comment s'effectue le transfert thermique de l'échangeur vers le dessicant est une chose, articuler la conception de ce transfert thermique aux autres conceptions qui portent sur l'évaporation et l'échange thermique entre la boisson et l'eau en est une autre.

Elle constate qu'elle a des difficultés à comprendre le processus dans son ensemble. Face à ces difficultés, elle décide, avec son collègue GN, de consulter les élèves du Groupe 1. (G2S41017)

Elle leur demande à quoi sert le dessicant dans le processus si l'évaporation a permis le refroidissement de la boisson. Les élèves du G1 lui répondent en chœur : « *parce qu'il faut adsorber la vapeur.* » Ce qui ne répond pas à sa question dans le contexte de son hypothèse. Elle ajoute : mais la boisson est refroidie.

BN qui a compris sa question lui explique que c'est le dessicant qui va créer la dépression. C'est celle-ci qui évapore l'eau. Il précise que l'évaporation de l'eau a besoin d'énergie et qu'elle la prend dans la boisson (G1S41108).

Elle note que le dessicant joue un rôle dans la dépression qui se produit. Mais elle ne comprend toujours pas pourquoi ni comment la dépression provoque une évaporation.

Elle reprend l'étude de la documentation recueillie, mais elle ne trouve pas de réponse

Dans sa conception de l'évaporation, celle-ci se fait dans des conditions de pression et de température déterminée, par un apport de chaleur. Elle réaffirme que l'évaporation se produit dans la canette par un apport de chaleur fournie par la boisson et non par dépression.

« Ce n'est pas la dépression qui crée un changement d'état c'est l'adsor... enfin c'est la chaleur fournie par la boisson qui permet à l'eau liquide qui est dans ta cavité 2 de se transformer en vapeur » (G2S41090)

On note que PA n'a pas compris :

– la raison du transfert thermique par dépression, puisqu'elle estime que la boisson est refroidie par l'évaporation,

– l'évaporation par dépression, puisqu'elle conçoit que celle-ci est produite généralement par un apport de chaleur.

6.2.8. Quelques commentaires :

PA n'a pas construit tous les concepts théoriques en rapport avec les phénomènes mis en jeu dans la situation nouvelle. Par exemple, les concepts de chaleur et de pression de vapeur saturante ne sont pas bien maîtrisés. Cependant, elle a construit les deux concepts principaux : le concept d'évaporation et d'adsorption. L'institutionnalisation à laquelle a procédé l'enseignante à sa manière lui a permis de généraliser l'évaporation à tous les changements de phase.

Pour la conception de l'objet technique, PA a fait l'effort de comprendre le fonctionnement de la canette. Comme ses collègues, elle n'est pas arrivée à le concevoir dans sa totalité. Dans cette tentative de conception de l'objet, on peut noter à la phase finale les points suivants :

- PA n'a pas compris que la vapeur produite génère une pression supérieure à celle qui règne dans le dessicant. Du fait qu'elle n'a pas compris que la vapeur produit une pression, elle ne peut pas comprendre l'origine de la dépression. Le texte l'informe de l'existence de cette dépression et cette information lui permet de résoudre le problème de l'évacuation de la vapeur. Elle considère la dépression comme un postulat qui lui permet de résoudre le problème de l'évacuation de la vapeur.

- Dans sa conception de l'objet technique, ce n'est pas la dépression elle-même qui lui pose un problème, mais son effet sur le transfert thermique (l'évacuation de la vapeur).

Elle estime qu'à partir du moment où la boisson est refroidie par l'évaporation de l'eau qui reste, elle ne voit pas l'intérêt d'évacuer la vapeur.

- La dépression lui pose un problème à un autre niveau. Elle ne comprend pas comment elle peut provoquer l'évaporation. L'évaporation par dépression est en contradiction avec son hypothèse d'une évaporation sous basse pression par un apport de chaleur.

C'est sur ce dernier point qu'elle va bloquer.

6.2.9. Les raisons de l'échec dans la construction du modèle de l'objet :

PA ne fait pas le lien entre l'effet en retour de la dépression sur la pression de vapeur qui ramène normalement la pression dans l'échangeur aux conditions initiales de vaporisation.

Dans sa conception, elle part de l'évaporation et étale le processus sur un seul plan horizontal, comme l'indique le schéma ci-dessous. Pour elle l'évaporation donne lieu à l'évacuation de la vapeur par une dépression. Dans ce schéma, ce n'est pas la dépression qui provoque l'évaporation.

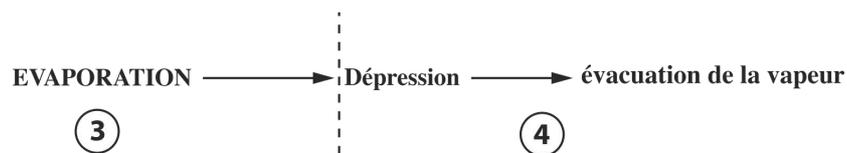


Figure 22. La dépression évacue la vapeur

Elle ne tient pas compte dans cette conception de l'effet de la production de la vapeur sur la pression à l'origine de la différence de pression qui en découle :

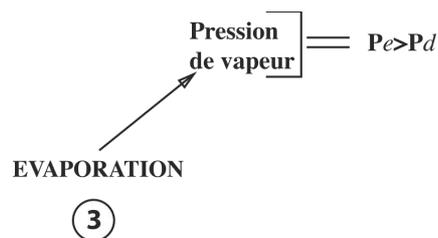


Figure 23. L'évaporation produit une pression de vapeur

L'effet en retour sur l'évaporation est indirect. Il y a des variables implicites en jeu que PA n'est pas en mesure d'inférer sans la conception de la pression de vapeur et de ses conséquences. Fonctionner avec un postulat peut fausser le raisonnement.

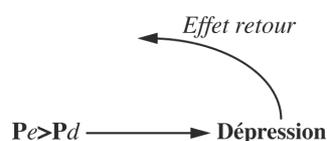


Figure 24. L'effet en retour de la dépression sur l'évaporation

Dans l'articulation des deux séquences 3 et 4 elle ne tient pas compte des deux effets simultanés de la dépression :

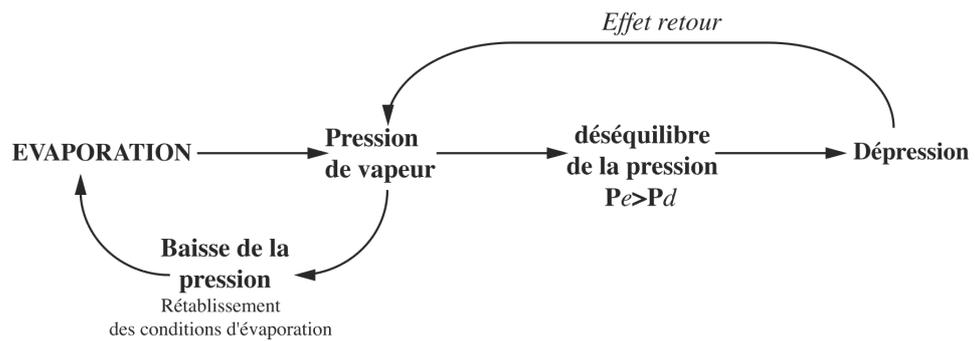


Figure 25. Les deux effets simultanés de la dépression

Ce qu'il faut noter c'est que, dans la même séquence, le phénomène de la dépression comporte deux sous séquences qui correspondent à deux relations confondues. La décomposition de ces deux sous séquences donnerait deux effets dans deux sens opposés : le transfert de la vapeur dans le dessicant (sens de l'échangeur vers le dessicant), et l'effet en retour de la dépression sur l'évaporation (sens du dessicant vers l'échangeur). Un même phénomène produit deux effets. C'est le propre d'un système complexe dynamique et autonome.

Dans cette dépression, PA ne tient compte que de la relation orientée dans un seul sens (sens de l'échangeur vers le dessicant). Elle ne tient pas compte de la relation orientée dans le sens inverse, parce qu'elle n'a pas pu conceptualiser cet effet en retour de la dépression.

En guise de conclusion à ce commentaire, on peut noter que dans le cas de PA, l'apprentissage essentiellement par le texte l'a conduit à un apprentissage des concepts. La situation-problème a contribué à cet apprentissage.

Par contre, la conception de l'objet technique essentiellement par le texte n'a pas été concluante. Le concept d'évaporation qu'elle a construit a compromis cette conception. Elle n'a pas pu construire le modèle de l'objet technique.

6.3. Construction des concepts chez DM :

6.3.1. L'adsorption :

L'adsorption est un concept nouveau pour DM.

Il aborde ce concept par la définition donnée dans le dictionnaire pour en avoir une représentation. Il l'identifie, à partir de cette définition, en tant que propriété du dessicant, matière qu'il semble connaître, qui se présente sous formes de petites billes conditionnées dans des sachets dans les emballages des chaussures (G2S10112). Cette propriété du dessicant consiste à « piéger » l'humidité. (G2S10111) (G2S10115).

Il le mobilise dans la canette et convertit l'adsorption en action de pompage de la vapeur. Par cette propriété, le dessicant agit comme une pompe à vapeur. (G2S10633)

À la troisième séance, il précise une deuxième propriété importante qui va modifier sa conception du pompage de la vapeur. Il considère que l'adsorption n'opère que sur la vapeur qui est à proximité du dessicant. (G2S30530)

Il cherche à comprendre comment l'adsorption piège la vapeur et la maintient prisonnière dans le corps du dessicant.

Il découvre dans la documentation théorique le processus par lequel l'adsorption fixe les molécules d'eau à la surface du corps. Il s'agit des forces de van der Waals.

C'est DM qui présente, lors de la restitution, le dessicant et la notion d'adsorption. Il distingue deux types d'adsorption : chimique et physique. Dans l'adsorption chimique il y a une modification des molécules adsorbées, ce qui n'est pas le cas dans l'adsorption physique. Dans la canette, il s'agit d'une adsorption physique. Celle-ci se réalise grâce aux forces de van der Waals qui sont des forces d'interaction électrostatiques.

DM a acquis par le texte le concept d'adsorption et l'a mobilisé dans la situation pour concevoir l'objet technique. Il a pu comprendre comment s'effectue l'adsorption dans la canette. La situation a contribué en partie à la construction de ce concept, elle lui a permis de transformer le concept théorique en un concept opératoire.

6.3.2. Le concept d'évaporation :

Durant les quatre séances DM cherche à comprendre comment le phénomène de l'évaporation se produit dans la canette. Il n'aborde pas ce phénomène à partir du concept théorique. Mais il l'aborde au début à partir des informations données sur ce phénomène dans le texte de l'article.

À partir de ces informations, il établit une relation entre l'évaporation, l'état de basse pression de l'eau et l'apport de chaleur. Pour DM c'est cet état de l'eau qui lui permet de s'évaporer. En s'évaporant elle extrait la chaleur ou les calories (G2S10572) (G2S10753) (G2S10757) (G2S10759).

Il a noté la définition que l'enseignante donne d'un changement d'état et d'une évaporation. Elle a énoncé à maintes reprises le concept de changement de phase et signalé que l'évaporation en est un cas particulier (G2S21036).

Il a aussi noté que sa collègue PA énonce souvent cette définition pour la rappeler à ses collègues. Il semble avoir compris en quoi consiste le concept de changement de phase et d'évaporation.

Il a retenu les conditions d'évaporation grâce à l'analogie proportionnelle proposée par l'enseignante.

Il estime que l'état sous vide ou sous basse pression constitue « *des conditions de changement différentes de l'atmosphère* » (G2S20767).

Mais, lorsqu'il tente de mobiliser le concept de l'évaporation dans la canette, il n'arrive pas à comprendre comment le phénomène que désigne ce concept s'effectue.

À la troisième séance, un énoncé révèle sa véritable conception de l'évaporation. Dans cette conception de l'évaporation, c'est la relation qu'il établit entre la chaleur et la température s'écarte de la relation qu'ont ces deux variables dans un changement de phase. Pour DM, la chaleur provoque systématiquement une augmentation de la température. Il estime que, dans l'évaporation, l'apport de chaleur provoque une augmentation de la chaleur. Il ne comprend pas pourquoi la chaleur ne provoque pas d'augmentation de température (G2S30487). DM, n'a pas compris l'exception à cette règle dans un changement de phase, notamment dans l'évaporation.

DM n'a pas réussi à acquérir le concept d'évaporation et de changement de phase et n'a pas réussi à transformer le concept général d'évaporation en un concept opératoire.

6.3.3. Les concepts de chaleur, calorie et température :

Ces trois concepts sont abordés ensemble dès le début de la première séance. DM définit chacun de ces concepts par les deux autres.

Dans ces définitions, il établit une relation entre la calorie et la température, la calorie et la chaleur, la chaleur et la température. Dans la définition de la calorie et de la chaleur, un quatrième concept apparaît : le concept d'énergie. Deux relations sont importantes à signaler : la relation qu'il établit entre la chaleur et la calorie, et la relation entre la chaleur et la température :

6.3.3.1 Chaleur :

DM conçoit la chaleur comme une quantité d'énergie thermique et est le seul dans le groupe à définir la chaleur comme une entité impalpable qui se manifeste, au niveau

microscopique, par une agitation moléculaire dans la vapeur. Autrement dit, il conçoit la chaleur en tant que transfert thermique. Mais il ne l'a défini à aucun moment comme un transfert d'énergie thermique. Lorsqu'il mobilise ce concept dans la canette, il utilise indifféremment le terme de calorie ou de chaleur.

6.3.3.2. Chaleur et calorie :

DM estime qu'une calorie est une quantité de chaleur (G2S10507).

C'est à travers sa réaction à l'explication que donne son collègue FG du déplacement des calories de la boisson vers le dessicant, que DM dévoile sa conception des calories et de la chaleur en tant que phénomène. Ce collègue a tendance à considérer les calories comme des particules.

En vérifiant dans le dictionnaire, il note que la calorie est une quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'un degré (G2S10330). Il considère qu'une calorie, c'est de la chaleur, et celle-ci c'est de l'énergie.

6.3.4. La relation entre la chaleur et la température :

Pour DM, la chaleur provoque toujours une augmentation de la température (G2S10321) (G2S40083) (G2S40921).

Cette conception de la relation de la chaleur à la température n'a pas changé chez DM à la fin de l'apprentissage.

6.3.5. Le concept de vide :

Dans un premier temps, DM distingue le vide d'une pression basse. Il conçoit le vide comme une absence totale de pression. Cette conception du vide va persister longtemps (G2S20340). Dans la situation, il considère que l'état sous vide de l'eau n'est pas l'état sous basse pression. La confrontation à la situation va l'amener à douter de cette conception du vide. Le rapprochement entre l'état sous vide et l'état sous basse pression apparaît vers la fin de la 2^e séance. Ce rapprochement se réalise par la prise de conscience de l'effet de ces deux états sur l'évaporation de l'eau. Celle-ci s'évapore sous basse pression et sous vide. DM se demande si l'état **sous vide** correspond à une basse **pression** ou une absence de **pression** (G2S20748).

La documentation technique lui fournit la réponse : la mise sous vide correspond à une basse pression. À la quatrième séance, cette transformation de sa conception du vide est consommée. Il conçoit que le vide correspond dans la canette à une basse pression. Il parle d'une pression sous vide (G2S41111).

La conception du vide comme basse pression ne concerne que la situation de la canette. DM n'a pas accédé au concept général en physique de vide. Aucun texte théorique ne lui a fourni la définition du vide.

DM a acquis le concept d'adsorption et l'a transformé en un concept opératoire en réussissant à le mettre en jeu dans la situation pour expliquer le phénomène qu'il désigne.

Pour les concepts de chaleur et d'évaporation, il n'a pas réussi à comprendre les phénomènes qu'ils désignent en les mettant en jeu dans la canette.

6.4. Conception de l'objet technique chez DM :

L'itinéraire de DM est plus marqué par sa préoccupation pour le transfert thermique par convection entre l'échangeur et le dessicant que pour l'évaporation ou pour l'échange thermique par conduction entre la boisson et l'eau de l'échangeur. Il a passé plus de temps à s'interroger sur le processus de ce transfert thermique que sur les autres phénomènes. Cet intérêt est influencé principalement par :

- les informations fournies par les textes et les significations qui s'en dégagent ;
- la position inversée de la canette.

Le texte de l'article met l'accent sur le rôle du dessicant dans le processus de réfrigération. DM en infère que le dessicant est l'élément déterminant dans le processus. Il identifie deux étapes dans ce processus : l'extraction des calories par l'évaporation de l'eau et le transfert de ces calories dans le dessicant. Pour lui le transfert se réalise par le pompage de la vapeur produite. Il va tenter de comprendre comment s'effectue ce pompage en étudiant la propriété du dessicant. Dans un premier temps, il attribue cette action de pompage au dessicant lui-même et à sa propriété d'adsorption. Autrement dit, il considère que l'adsorption assure ce pompage de la vapeur. Ensuite, il attribue cette fonction au vide dans la cavité du dessicant. Dans cette conception, il considère que le vide aspire la vapeur. Il consacre beaucoup de temps à l'étude des concepts d'adsorption et de pompage. En parallèle, il étudie comment s'effectue l'évaporation dans la canette (l'implicite c'est la température : comment l'évaporation se réalise à basse température). Il la lie à l'effet de la basse pression. Lorsqu'il évapore, il a des problèmes pour évacuer la vapeur. La position inversée de la canette ne lui facilite pas la compréhension de ce transfert de la vapeur vers le dessicant. à travers la barrière de l'eau

Lorsqu'il accède à la documentation technique et scientifique, il se centre sur la recherche d'informations lui permettant d'expliquer ce transfert thermique. Les questions qu'il se pose sur ce phénomène orientent sa recherche documentaire.

Cette documentation lui apporte des informations qui vont lui compliquer le problème. En effet elle établit un lien de causalité entre l'évaporation et le pompage de la vapeur et introduit un phénomène : la dépression. DM n'arrive pas à la concevoir ni à la mobiliser dans le processus de réfrigération.

La conception de l'objet technique chez DM s'est développée progressivement au travers des hypothèses suivantes :

- transfert thermique par le vide existant dans la cavité du dessicant
- transfert thermique par le pompage de la vapeur
- évaporation totale de l'eau avant l'ouverture de la valve indépendamment de la réfrigération
- évaporation totale avant l'ouverture de la valve en relation avec le rafraîchissement de la boisson
- pompage par l'action de la vapeur sur le vide existant dans la cavité du dessicant
- évaporation avant et après l'ouverture de la valve par la mise en jeu de l'état diphasique
- pompage par diffusion de la vapeur et par adsorption
- évaporation par dépression après l'ouverture de la valve.

6.4.1. L'hypothèse d'un transfert thermique par le vide existant dans la cavité du dessicant

DM part des données du texte pour aborder le fonctionnement de la canette. Il note que le pompage et l'adsorption jouent un rôle essentiel dans la réfrigération par le système de la canette. Il commence par l'examen des données relatives à ce phénomène.

Il aborde donc le système par le transfert thermique par convection qui a lieu entre l'échangeur et la cavité du dessicant. Il exprime ce transfert thermique en termes de « transfert de chaleur ». Dans un premier temps, il attribue ce transfert de chaleur à l'ouverture de la valve et à l'existence de vide dans la cavité du dessicant (G2S10553).

Selon lui l'ouverture de la valve modifie le vide dans la cavité du dessicant, ce qui provoque la descente de la chaleur (G2S10561).

Rappelons que DM, comme ses collègues, aborde la canette dans sa position inversée de fonctionnement. Ce qui explique qu'il conçoit que « *la chaleur descend* ».

Notons que DM n'évoque pas l'évaporation et l'échange entre la boisson et l'eau de l'échangeur. Il est centré uniquement sur une partie du système : sur ce qui se passe entre l'échangeur et le dessicant.

6.4.2. L'hypothèse d'un transfert thermique par le pompage de la vapeur

Le texte évoque un pompage de la vapeur : « le dessicant agit comme une pompe à vapeur ». Ses collègues assimilent le dessicant à un appareil qui pompe la vapeur. DM leur précise que le texte ne dit pas que le dessicant est une pompe à vapeur, mais qu'il agit « *comme* » une pompe à vapeur (G2S10633). Il précise également que l'ouverture de la valve permet au dessicant de jouer son rôle de pompe à vapeur (G2S10635) et lui permet d'adsorber la vapeur (G2S10651).

6.4.3. L'hypothèse d'une évaporation totale de l'eau avant l'ouverture de la valve indépendamment de la réfrigération

Il note que le texte établit un lien entre l'évaporation et le pompage de la vapeur. DM passe de la séquence du transfert thermique dans le dessicant à celle de l'évaporation.

Il tente de préciser le moment de l'évaporation. Les choix qui s'offrent à lui sont :

- une évaporation lors de la fabrication de la canette (à l'usine) ;
- une évaporation lors de la mise de la canette à la disposition du consommateur ;
- une évaporation à l'ouverture de la valve ou après ;

Au début, il n'envisage que l'éventualité d'une évaporation totale avant ou après l'ouverture de la valve. C'est une hypothèse partielle qui s'appuie essentiellement sur les données du texte de l'article sur la canette.

Toutes les hypothèses qu'il élabore sur une évaporation totale avant ou après débouchent sur des contradictions avec la situation.

L'hypothèse d'une évaporation totale avant est initiée par une proposition de PA qui fait remonter sa production au moment où la boisson est mise dans la canette (G2S10556) (G2S10769).

DM adhère (G2S10557) à cette hypothèse de PA. Il va réaffirmer cette hypothèse (G2S10776) plus loin dans le débat avec DST avec lequel il est en désaccord sur la possibilité d'une évaporation qui se produit lorsqu'on appuie sur la valve (G2S10765) (G2S10775).

Dans cette première hypothèse, il aborde l'évaporation en tant que phénomène local sans le relier au processus global de réfrigération.

6.4.4. L'hypothèse d'une évaporation totale avant l'ouverture de la valve en relation avec le rafraîchissement de la boisson

DM reprend cette hypothèse locale sur l'évaporation et la relie à la réfrigération. Il part d'un état initial où l'eau est sous forme vapeur.

Il relève une contradiction qu'il met en évidence par le raisonnement suivant :

Si « *l'eau en s'évaporant sous basse pression extrait les calories* » (G2S10785)

Et si l'eau est déjà à l'état vapeur au départ avant l'ouverture de la valve, (G2S10788) il n'y aura plus de liquide à évaporer, et donc on ne pourra plus extraire de calories (G2S10792).

Il infère de ce raisonnement que l'eau, même sous basse pression, doit être à l'état liquide avant. (G2S10785)

L'hypothèse d'un état totalement liquide avant l'ouverture de la valve, lui semble aussi en contradiction avec le processus de réfrigération tel qu'il est rapporté par le texte de l'article. Ce texte précise que l'eau s'évapore sous basse pression (G2S10559) (G2S10785) ; l'évaporation sous basse pression extrait les calories de la boisson (G2S10559) ; lorsque le consommateur appuie sur le bouton poussoir (G2S10559) les calories sont simplement déplacées de la boisson vers le fond de la canette. Ce texte tend à lui suggérer que l'évaporation a lieu avant l'ouverture de la valve. Il maintient son hypothèse d'une évaporation avant, en lui incorporant un élément qui tente de relier le rafraîchissement de la boisson au transfert thermique (influence de l'article). Il considère qu'avant l'ouverture de la valve, un échange thermique a lieu entre la boisson et l'eau jusqu'à l'équilibre thermique. Lors de cet échange, l'eau s'évapore totalement. Mais la boisson n'est pas rafraîchie parce que la vapeur produite reste en contact avec la boisson et maintient sa température initiale. Après l'ouverture de la valve, la vapeur descend dans le dessicant, la boisson n'étant plus en contact avec la vapeur, refroidit. Il estime que lorsque la vapeur est transférée, la chaleur est transférée avec elle. Et c'est à ce moment que la boisson commence à refroidir. Il estime que ce transfert de la vapeur dure 5mn (G2S10843). Autrement dit, le refroidissement de la

boisson se fait au fur et à mesure que la vapeur passe dans la cavité du dessicant. Ce processus de refroidissement dure 5mn.

On note que DM aborde la canette dans sa position inversée. Il évoque une descente de la vapeur dans le dessicant. C'est à ce niveau que son hypothèse est en contradiction avec la situation. La vapeur ne descend pas, elle monte.

6.4.5. L'hypothèse d'un pompage par l'action de la vapeur sur le vide existant dans la cavité du dessicant

À la deuxième séance, il reprend son hypothèse du transfert thermique par le vide (G2S20219) et lui apporte quelques modifications après avoir exploré le concept de pompe à vapeur.

Ouverture de la valve ->transfert de chaleur -> le dessicant réagit comme une pompe à vapeur (G2S20219)

DM considère que le pompage de la vapeur est mis en jeu au moment où la **valve** s'ouvre. Mais il n'est plus sûr que ce pompage est le fait uniquement du vide dans la cavité du dessicant.

Il associe l'action de la vapeur à celle du vide. La vapeur passe du statut d'objet à celui d'acteur. Il considère qu'au début la vapeur est dans le compartiment de l'échangeur. Après, à l'ouverture de la valve, elle va se répartir entre les deux compartiments. Ce qui modifie l'état de sous vide du dessicant (G2S20601). Le vide n'est plus l'agent dans le pompage, il est l'objet d'une transformation.

On peut noter que son hypothèse évolue et se développe en gardant sa structure de base.

6.4.6. L'hypothèse d'une évaporation avant et après l'ouverture de la valve par la mise en jeu de l'état diphasique

Toutes les hypothèses précédentes soutiennent que l'évaporation dans la canette est totale et se produit avant l'ouverture de la valve. Plusieurs textes soutiennent qu'à l'ouverture de la valve, la vapeur est déplacée dans le dessicant. Ce qui suppose une évaporation avant l'ouverture de la valve.

Dans un brevet, DM note qu'une dépression initie l'évaporation à l'ouverture de la valve. Autrement dit, l'évaporation se produit après l'ouverture de la valve. Ce qui remet en question ses hypothèses précédentes. L'information donnée par ce texte semble à DM

contradictoire avec les informations recueillies dans les textes qu'il a étudiés avant. Il semble être dans une impasse.

D'autres textes l'informent de l'existence d'un état diphasique avant l'ouverture de la valve. (G2S30150) (G2S30179) (G2S30255). Cette phase liquide-vapeur ou état diphasique est mise en évidence également par le diagramme de phase. Dans ce diagramme, l'état diphasique est représenté par une courbe qui délimite les deux phases (liquide, vapeur).

Son hypothèse d'une évaporation avant n'est pas remise en question. Avec cette nouvelle information de l'existence d'un état diphasique avant, DM admet facilement l'évaporation après puisqu'il ne remet pas en question cette deuxième évaporation. L'hypothèse d'une évaporation avant et après l'ouverture de la valve est pour lui possible grâce à l'existence d'un état diphasique.

6.4.7. L'hypothèse d'un pompage par diffusion de la vapeur et par adsorption

Le concept de pompage de la vapeur lui pose toujours un problème. Mais il a fait de nombreux progrès.

Dans une nouvelle hypothèse (G2S20767), il n'évoque plus le vide de la cavité du dessicant, dans le phénomène de pompage. Il estime que le vide correspond à une basse pression. Or l'échangeur est à basse pression. Il estime que la pression est équivalente dans les deux compartiments. Il a aussi avancé dans la construction du concept d'adsorption. Il estime que celle-ci consiste à attirer la vapeur qui est à proximité du dessicant (G2S30530). Il n'attribue plus le phénomène de pompage au seul fait de l'adsorption. Dans une autre hypothèse (G2S30530), il estime qu'à l'ouverture de la valve, la vapeur va se répartir dans les deux cavités. Il estime que la vapeur a tendance à occuper tout l'espace qui lui est offert. En se diffusant dans l'espace de la cavité du dessicant la vapeur va être à proximité de celui-ci qui va pouvoir l'adsorber. En l'adsorbant, l'espace dans le dessicant se libère et la vapeur qui reste, continue à se répartir dans le volume occupé par le dessicant.

« Ça se peut que ça soit ça parce que lui il attire facilement la vapeur qui va être à proximité ; donc la vapeur ça va être un gaz, ça va occuper tout l'espace donc au fur et à mesure que lui va adsorber la vapeur, la vapeur restante va se répartir toujours en continu sur le volume et ainsi de suite, je ne sais pas si vous voyez, ça peut-être ça »
(G2S30530)

L'implicite dans cet énoncé est un élément nouveau dans la conception de l'adsorption. Du débat avec DST, DM retient le fait que la vapeur se condense et devient

liquide lorsqu'elle est adsorbée. DST lui précise (G2S30524) que la condensation liquide de la vapeur est facilitée par le diamètre du dessicant utilisé. De cette information, DM infère que l'adsorption libère l'espace dans la cavité du dessicant en convertissant la vapeur en liquide, ce qui permet à la vapeur de continuer à se diffuser dans la cavité du dessicant (G2S30530).

6.4.8. L'hypothèse d'une évaporation par dépression après l'ouverture de la valve.

À la quatrième séance DM engage un long débat avec ses collègues à propos du rôle que joue la dépression dans le processus de réfrigération. Ce débat révèle sa conception de l'objet technique à la fin de cette séance.

Au cours de la troisième et la quatrième séance, DM a recueilli des informations sur la dépression dont les plus importantes pour lui sont reprises au cours de ce débat. Ces informations sont :

- la dépression entraîne un changement d'état (G2S41089)
- la vaporisation est initiée par le vide (G2S41093)
- le vide est maintenu par le pompage (G2S41093)
- l'évaporation se produit sous l'effet d'une pression réduite (G2S40106)
- la pression réduite est maintenue par un pompage de la vapeur (G2S40106)

(G2S40110)

Dans le débat avec ses collègues, il se pose trois questions principales qui portent sur :

- l'origine de la dépression ;
- la relation entre la dépression et l'évaporation ;
- la relation entre le transfert thermique et la dépression.

DM se demande d'où vient la dépression (G2S41087) (G2S41089). Ses collègues lui répondent qu'elle est le fait d'une différence de pression. DM ne comprend pas non plus l'origine de cette différence de pression. À la troisième séance il s'est déjà posé cette même question. Il considère que le vide équivaut à une basse pression. Il estime que les deux cavités sont à la même pression basse. (G2S30410). Il se demande d'où provient la dépression alors que les 2 cavités sont sous vide, et donc à la même pression (G2S30410).

En partant de l'hypothèse d'une évaporation sous l'effet d'une pression réduite, il se demande pourquoi elle peut également être initiée ou produite par la dépression (G2S41111) (G2S41113).

Ses collègues, notamment PA, lui répondent que la dépression déplace la vapeur, la vapeur descend, et l'eau liquide qui reste va capter l'énergie pour vaporiser. (G2S41117) (G2S41118) (G2S41120)

Dans cette réponse, la dépression déplace la vapeur vers le dessicant. L'eau liquide qui reste dans l'échangeur va capter l'énergie à la boisson et se vaporiser. DM ne comprend pas le rapport entre la dépression et le déplacement de la vapeur. Dans son hypothèse précédente la vapeur se déplace par diffusion. C'est la raison de ses dernières questions « *pourquoi déplacer la vapeur* » (G2S41123) (G2S41125). Il ne reçoit aucune réponse satisfaisante à ces questions.

Sa conception de l'objet technique bloque sur ces trois questions auxquelles il n'a pas de réponse. Elle reste inachevée.

Il n'arrive pas à établir la relation entre la dépression et le retour à l'état sous BP pour obtenir une évaporation dans les conditions initiales : température ambiante et BP.

DM cherche à comprendre l'origine de la dépression et la relation directe entre la dépression et l'évaporation. Le fait de la dépression et celui de la relation de celle-ci à l'évaporation sont en contradiction avec les hypothèses partielles qu'il a élaborées.

Les raisons qui empêchent DM d'achever sa conception de l'objet technique :

- il conçoit que le déplacement de la vapeur se fait par sa diffusion dans la cavité du dessicant. Cette conception est en contradiction avec un déplacement de la vapeur par dépression.

- il ne prend pas en compte la pression de vapeur. Ce qui a un double effet :

- Il ne comprend pas l'origine de la différence de pression, et la dépression qui en découle. Cette dépression est en contradiction avec sa conception d'une pression basse équivalente dans les deux cavités.

- Il ne comprend pas l'effet indirect de la dépression sur l'évaporation. L'évaporation par une dépression est en contradiction avec sa conception de l'évaporation sous basse pression par un apport de chaleur⁵⁹.

59 - Rappel : La dépression déplace la vapeur vers le dessicant. Par le déplacement de la vapeur, elle élimine la pression de vapeur pour ne laisser que la pression initiale de vaporisation exercée sur l'eau liquide.

DM tente d'établir la chaîne causale lui permettant de relier l'ensemble des phénomènes et de parachever sa conception de l'objet technique. Mais il lui manque un maillon important de cette chaîne : la pression de vapeur.

Chapitre 5

Discussion générale

Nous aborderons cette discussion selon trois axes. Le premier distingue deux types d'apprentissage : par le texte et par les situations. Le second distingue deux types de concepts mobilisés dans ces apprentissages : le concept *outil* et le concept *objet*. Le troisième traite des obstacles liés à ces deux types d'apprentissages et à la construction de ces deux types de concepts.

1. Apprentissage par les situations et apprentissage par le texte :

L'apprentissage par les situations est un apprentissage qui s'appuie sur l'action (ou opérations) sur une situation. Pour qu'une situation déclenche le processus d'apprentissage il faut qu'elle comporte un problème à résoudre. Sans problème, il n'y a pas lieu d'apprentissage. Ce type d'apprentissage est celui que l'on observe généralement chez un sujet en prise avec des problèmes qu'il rencontre dans le quotidien ou dans une activité professionnelle. Deux éléments caractérisent ce type d'apprentissage : l'*action* et une *situation-problème*.

L'apprentissage par le texte est un apprentissage des concepts. Quel que soit le contenu d'un texte, il donne d'abord un accès à des concepts, y compris le texte qui rend compte d'une situation réelle. Avant d'accéder à cette situation réelle, il faut passer par le concept qu'il faut comprendre et interpréter. Il existe plusieurs variétés de concepts. Nous verrons plus loin dans ce chapitre comment on peut les distinguer. Quel que soit le contenu d'un texte, les concepts auxquels il donne d'abord accès se présentent comme des *objets* extérieurs au sujet apprenant. L'apprentissage par le texte est celui qui a longtemps prévalu à l'école, dans l'enseignement et dans l'Education Nationale. Dans cette institution sociale, on apprend surtout par le texte : des savoirs, des concepts et des théories. On peut aussi apprendre par le texte à résoudre des problèmes, mais ce sont généralement des problèmes abstraits sans lien avec la réalité.

Dans l'APP observé, l'apprentissage effectué par le premier groupe d'élèves s'apparente à un apprentissage par les situations et l'apprentissage effectué par le second groupe s'apparente à un apprentissage par le texte. Pourtant, les deux groupes sont confrontés à la même tâche, sont placés dans la même situation et disposent des mêmes conditions d'apprentissage. On peut se poser la question pourquoi un groupe s'est orienté vers un apprentissage par les situations et

l'autre vers un apprentissage par le texte. Les élèves de ces deux groupes ne disposent pas des mêmes ressources cognitives.

1.1. L'apprentissage dans le premier groupe : un apprentissage par les situations dans une activité de conception

Les élèves de ce groupe disposent d'un modèle analogique d'une situation connue pour aborder la situation nouvelle.

Ce que l'on note dans ce groupe, c'est que le recours au modèle analogique du réfrigérateur s'est effectué spontanément. Personne ne leur a suggéré de faire appel à cette analogie. On leur a proposé l'analogie de la cruche d'eau, mais cette analogie ne correspond pas à une ressource interne chez les élèves. Ils l'ont abordé comme une situation nouvelle à comprendre. Il faut comprendre la cruche, pour comprendre la canette pour pouvoir construire des concepts scientifiques. Ce qui complique la tâche des élèves. Par contre, le modèle du réfrigérateur constitue une ressource cognitive pour aborder la situation nouvelle, notamment chez les deux élèves BN et DL qui ont influencé leur groupe.

Par ailleurs, les élèves disposent d'un guide de l'étudiant d'APP qui leur prescrit une méthode formelle d'apprentissage, qui dicte une progression logique par étape. Il faut effectuer l'étape précédente avant de passer à l'étape suivante (cf. chapitre 2 : la tâche). L'enseignante vérifie le respect de ces étapes lors de ses passages dans les groupes. Les élèves de ce groupe n'ont pas respecté à la lettre ces étapes. Mais pour satisfaire les attentes de l'enseignante, ils ont rempli à chaque séance les documents qui justifient qu'ils ont respecté les étapes. Cependant, on note que dans l'activité, ces étapes n'ont pas été respectées. Ils étaient simultanément dans la clarification des concepts, dans la confrontation des représentations et dans la conception du fonctionnement de la canette depuis le début de la première séance, alors qu'ils ne devaient l'aborder qu'à la fin de la troisième ou de la quatrième séance. Le fait de disposer d'un modèle d'une situation connue les a engagé, dès la première séance, dans la conception du fonctionnement de la canette.

Bien entendu, ce modèle analogique constitue une représentation du fonctionnement d'un *objet* technique connu qui s'avère non adaptée au fonctionnement de l'*objet* technique nouveau. Les deux *objets* techniques, le connu et le nouveau, sont structurellement différents. La genèse de la conception de l'*objet* technique nouveau s'est réalisée par une série de rectifications successives. Les élèves de ce groupe ont finalement réussi au bout de trois séances, à concevoir le fonctionnement de cet *objet* technique nouveau.

Dans l'apprentissage d'une situation nouvelle le recours à une situation connue est-il une nécessité ? Pour le savoir nous allons comparer l'apprentissage dans ce groupe à celui du second groupe.

1.2. L'apprentissage dans le second groupe : un apprentissage par le texte dans une même activité de conception

Dans le second groupe, les élèves ont aussi cherché spontanément à mobiliser l'analogie. GN a proposé à ses collègues l'analogie de la chaudière pour comprendre l'échange thermique dans la canette. Ce modèle analogique de la chaudière s'est révélé non pertinent, ils l'ont abandonné. Ils ont aussi tenté d'utiliser l'analogie prescrite de la cruche. Comme leurs collègues du premier groupe, ils l'ont abordé comme une situation nouvelle à comprendre. Ils se sont retrouvés face à deux situations non connues à comprendre : celle de la cruche et celle de la canette. La première est sensée leur permettre de comprendre la seconde. Mais cette situation de la cruche étant non connue, elle ne constitue pas une ressource cognitive pour aborder la situation de la canette. En définitive, aucun élève de ce groupe ne dispose d'un modèle analogique pertinent d'une situation connue pour aborder la situation nouvelle. Il ne leur restait que le texte pour réaliser la tâche. Or, le texte ne fournit que des concepts. Ils ont tenté de comprendre le fonctionnement de la canette à l'aide des textes. Mais ils s'arrêtaient à chaque concept pour l'étudier afin de le comprendre. Finalement toute leur activité a été consacrée à l'étude des concepts.

Ces élèves ont relativement respecté les étapes du guide de l'étudiant d'APP notamment au cours des deux premières séances. Mais ils ne l'ont pas appliqué à la lettre.

Ni les concepts appris par le texte, ni le guide de l'APP ne leur a permis de concevoir l'*objet* technique. Ils ont surtout appris des concepts.

Quelques observations :

Première observation : ces deux manières d'aborder cet APP correspondent à deux manières d'apprendre : par les situations ou par le texte. Dans l'apprentissage par les situations on apprend à résoudre des problèmes. Dans l'apprentissage par le texte, on apprend des concepts.

Deuxième observation : lorsqu'on est face à une situation nouvelle complexe, on a tendance spontanément à mobiliser un modèle analogique d'une situation. Lorsqu'on dispose d'un modèle analogique pertinent, on est capable de comprendre la situation nouvelle et de la concevoir, même si ce modèle n'est pas complètement adapté au départ à la situation nouvelle. Dans ce cas, la conception de la situation nouvelle consiste à transformer le modèle

initial pour l'adapter à la situation nouvelle. Cette transformation s'effectue selon le processus d'équilibration. Le résultat est un modèle opératif nouveau.

Troisième observation : lorsqu'on ne dispose pas d'un modèle analogique d'une situation connue, et qu'on ne dispose que du texte, l'apprentissage d'une situation nouvelle s'avère très difficile. Ce qui ne signifie pas qu'il est impossible. Après tout, il y a plusieurs générations qui ont appris uniquement par le texte. Mais cet apprentissage sera probablement très long, très coûteux et difficile, et il n'est pas sûr qu'il donnera lieu à un MO cohérent et pertinent.

Les inventeurs de la canette n'ont pas conçu un *objet* technique définitif et opérationnel dès le premier coup. Ils ont dû s'y prendre à plusieurs reprises avant d'aboutir à un *objet* qui fonctionne relativement correctement. Ils ont procédé à une série d'expérimentations et modifié leur conception initiale de l'*objet*. La conception définitive, qui a donné lieu à la réalisation de la première canette, a aussi été revue suite au constat de quelques imperfections notamment au niveau de la forme de l'échangeur et de sa valve (taille, ailette, séparateur vapeur-liquide). Comme l'a noté Béguin, une conception continuée dans l'usage est le propre de la conception des *objets* techniques.

Pour approfondir notre analyse de ces deux apprentissages nous allons l'aborder à partir de la distinction que fait Régine Douady (1982, 1986) entre un concept *outil* et un concept *objet*.

2. Concept *outil* et concept *objet* dans les deux types d'apprentissages :

On peut caractériser un apprentissage en l'abordant par la nature des concepts en jeu et la fonction qu'ils occupent dans cette activité.

2.1. La nature du concept :

Dans la nature des concepts on distingue les concepts issus d'un savoir "constitué" et les concepts qui sont produits par une activité de conceptualisation du réel :

2.1.1. Les concepts issus d'un savoir "constitué" correspondent généralement aux concepts scientifiques. Ce sont des concepts fournis par le texte (oral ou écrit). Ces concepts sont explicites et définis. Ils s'inscrivent dans des relations qui constituent avec d'autres concepts un savoir. Ils sont indépendants des situations particulières.

Dans l'APP observé, ces concepts sont ceux fournis par le cours de thermodynamique. Les élèves y ont accès sur le site des sciences et techniques de l'ingénieur. La liste de ces concepts est donnée à la fin du chapitre 2 (La Tâche).

2.1.2. Les concepts produits par une activité de conceptualisation du réel, sont des concepts qu'on élabore généralement dans un apprentissage par les situations. Ce ne sont pas des concepts scientifiques. Dans l'activité de conception, ils correspondent à ce que Pastré (2011) appelle des "représentations conceptualisées", pour les distinguer des entités incarnées qui servent l'action et dont le sujet n'a pas conscience. Ces représentations conceptualisées ont deux propriétés : elles sont construites par le sujet lui-même dans l'interaction avec le réel, et restent liées à la situation pour laquelle elles ont été conçues.

Dans l'APP observé, ces concepts correspondent aux représentations mobilisées par les élèves dans leur apprentissage.

On peut ajouter une troisième propriété à ces représentations : elles sont souvent mobilisées dans des situations dont elles ne sont pas issues, qui présentent des similitudes avec la situation pour laquelle elles ont été conçues. Autrement dit, elles sont utilisées fréquemment dans des modèles analogiques et sont adaptées à des situations nouvelles par rectification et corrections lorsqu'elles rencontrent des contradictions.

Pour préciser le statut que peut avoir chacun de ces deux types de concepts dans un apprentissage, Régine Douady propose de les distinguer par la fonction qu'ils occupent dans cette activité.

2.2. La fonction du concept :

Pour Régine Douady, quelle que soit la nature d'un concept, celui-ci peut remplir une fonction d'*outil* ou une fonction d'*objet*.

2.2.1. Le concept outil :

Selon Douady (1986) « Un concept est *outil* lorsque nous focalisons notre intérêt sur l'usage qui en est fait pour résoudre un problème ». Le statut d'*outil* d'un concept est lié à son utilisation pour agir sur une situation.

Pastré (2011), précise à la suite de Douady, que « les concepts *outils* sont des instruments pour l'action, ils servent à opérer ». Le « concept *outil* est ce par quoi on pense ». Un concept *outil* est donc un concept mobilisé dans une action ou une opération (au sens de Piaget) en situation. Il demeure enraciné dans la situation qui contribue d'ailleurs à son élaboration.

2.2.2. Le concept objet :

Pour Douady (1986), « un concept *objet* est un *objet* culturel ayant sa place dans un édifice plus large qui est le savoir savant à un moment donné, reconnu socialement » (Douady, 1986, p.9).

Pour Pastré, « les concepts *objets* sont ces mêmes concepts *outils* quand ils sont inscrits dans le texte d'un savoir » (idem). Un concept *objet* ne constitue pas un instrument cognitif pour penser une situation singulière et l'expliquer. Il n'a donc pas une fonction d'*outil*. Le sujet l'aborde comme un *objet*. On peut apprendre un concept *objet* sans pouvoir l'utiliser dans une situation déterminée. Parce qu'un concept *objet* s'applique à tous les possibles. Et parce qu'il ne constitue pas une représentation liée à une situation. Ces concepts *outils* ne sont pas des concepts scientifiques.

A partir de ces distinctions on peut étudier le passage d'une fonction d'un concept à l'autre.

On pourrait résumer ce qui précède par un tableau à double entrée :

Nature	Concept issu d'un savoir	Représentation conceptualisée
Fonction		
Fonction <i>outil</i>	1	3
Fonction <i>objet</i>	2	4

On peut noter qu'un concept issu d'un savoir et la représentation conceptualisée peuvent jouer tour à tour la fonction d'*outil* (1, 3) ou la fonction *objet* (2, 4). Cependant :

- Les représentations conceptualisées se présentent naturellement dans leur fonction *outil* (on conceptualise pour résoudre ses problèmes)
- Les concepts issus d'un savoir se présentent naturellement dans leur fonction *objet*.

Toute la question est de savoir comment on peut passer d'une fonction à l'autre dans les deux catégories de concepts considérés à partir de leur nature, et quel est le passage qui convient le mieux dans un apprentissage.

2.3. Nature et fonction des concepts :

2.3.1. Nature et fonction des concepts chez BN :

Dans l'APP observé, la plupart des concepts mobilisés par BN pour concevoir l'*objet* technique sont des représentations conceptualisées. Les premières représentations, qu'il mobilise au cours de la première séance, sont liées à la situation du réfrigérateur. Il s'agit principalement des concepts d'évaporation et de transfert thermique. Dans les séances suivantes, il va mobiliser d'autres concepts issus d'autres situations connues, notamment la représentation de l'adsorption. Chez BN l'adsorption est liée à deux situations de lutte contre

l'humidité où l'adsorption intervient. Il ne connaissait pas ce mot mais il disposait du concept. Sa représentation de l'adsorption était imprécise et approximative.

BN disposait aussi du concept de transfert thermique et l'utilisait dans ces deux fonctions *outils* et *objet*. Dans une interaction avec son collègue DL à propos de la chaleur, il l'utilise dans sa fonction *objet*. Il précise à ce collègue que la chaleur est un transfert d'énergie thermique. Il connaissait également les trois modes de transfert thermique : la conduction, la convection et le rayonnement. Lorsqu'il énonce la définition du transfert thermique, le concept est considéré dans sa fonction *objet*. Dans l'explication qu'il donne du fonctionnement du réfrigérateur, ce concept est utilisé dans sa fonction *outil*. Dans cette explication, il exprime sa représentation du transfert thermique, dans cette situation particulière. Et lorsqu'il explique le fonctionnement de la canette il exprime sa représentation du transfert thermique, dans cette deuxième situation particulière. Bien entendu, le concept *outil* du transfert thermique dans les deux situations n'est pas le même. Chacun reste attaché à la situation dans laquelle il opère. Mais ces deux concepts *outils* disposent d'un fond commun que l'on retrouve dans le concept *objet*. BN est capable de définir ce concept dans sa dimension macroscopique et microscopique. Or ce qui manque à beaucoup d'élèves c'est la maîtrise de ces deux dimensions du concept de transfert thermique notamment la dimension microscopique. C'est cette dernière dimension qui différencie par exemple la conception ancienne de la chaleur, de celle introduite par la thermodynamique. Avec ce concept de transfert thermique, BN illustre bien le cas de la maîtrise d'un concept dans ses deux fonctions *outil* et *objet*.

Pour l'évaporation, BN ne dispose pas au départ du concept scientifique de l'évaporation, ni de celui de changement de phase. Autrement dit, il ne dispose pas du concept dans sa fonction *objet*. Par contre, il dispose d'une représentation de l'évaporation de l'eau dans la situation quotidienne et d'une représentation de l'évaporation du fréon dans la situation du réfrigérateur. Ces deux représentations ont en commun la relation à la chaleur. Dans les deux cas, l'évaporation se réalise pour BN par un apport de chaleur. Mais cette relation commune n'est pas suffisante, dans ce cas, pour constituer un fond commun pouvant servir d'invariant pertinent pour BN, parce qu'il retient plutôt la différence. Dans les deux situations la relation qui lui semble, à tort, la plus pertinente est celle qu'il établit entre les propriétés intrinsèques du fluide (l'eau et le fréon) et l'évaporation. Nous sommes en présence d'un cas où les deux concepts *outils* sont, du point de vue du sujet, structurellement différents par rapport à un phénomène, qui est le même du point de vue objectif. Du fait que sa conception se fonde sur une différence, ce qu'il retient est la propriété intrinsèque du fluide. Le fréon a des propriétés

qui lui permettent de s'évaporer à basse température, l'eau a des propriétés qui ne lui permettent de s'évaporer qu'à 100°. Dans ces deux conceptions BN ne fait pas intervenir la pression. Ce qui conforte l'idée que sa représentation de l'évaporation, dans les deux cas, se fonde essentiellement sur les propriétés intrinsèque du fluide, c'est-à-dire de la matière, et sur l'apport de chaleur.

Ce qui intéressant à noter aussi, c'est que la confrontation de ces deux représentations à la situation nouvelle va avoir un double effet : un effet sur sa représentation de l'évaporation de l'eau et un effet sur sa représentation de l'évaporation du fréon. Ces effets sont provoqués par la réponse de la situation nouvelle. Pour BN l'eau ne s'évapore qu'à 100°. Dans la canette, l'eau s'évapore à basse température. La situation nouvelle est en contradiction avec sa représentation de l'évaporation de l'eau. On assiste à une quadruple confrontation (représentation de l'évaporation de l'eau confrontée à la représentation de l'évaporation du fréon et la confrontation de chacune de ces deux représentations à chacune des deux situations : la connue et la nouvelle). Deux concepts *outils* différents et indépendants l'un de l'autre vont être confrontés à une situation réelle nouvelle. Cette confrontation va provoquer au niveau interne une mise en rapport de ces deux concepts *outils*. Tout le travail est de trouver le moyen de les transformer pour les adapter simultanément aux deux situations : l'ancienne et la nouvelle. Car BN tient à son concept *outil* lié à la situation du réfrigérateur. Mais, il est désormais remis en question par la situation nouvelle, par effet ricochet. C'est-à-dire par la remise en question du concept *outil* d'évaporation de l'eau.

C'est de ces confrontations et des contradictions qui en découlent que va se développer le concept *outil* de l'évaporation dans la situation de la canette chez BN.

2.3.2. Nature et fonction des concepts chez DL :

Dans l'analyse, nous avons signalé que BN et DL ont deux représentations différentes de la même situation. En termes d'analogie, celle de BN est structurelle et celle de DL est une analogie de surface. En termes de représentation, celle de BN est conceptuelle, celle de DL est plutôt *figurative*. Celle-ci fonctionne comme un *outil*. C'est ce par quoi il pense le fonctionnement du réfrigérateur. Là aussi, on est en présence de deux concepts *outils* dans la même catégorie qui ne sont pas de la même nature. Une représentation figurative n'a pas la même puissance dans les opérations qu'une représentation conceptuelle. Il est encore plus difficile de comprendre une situation nouvelle à l'aide d'une représentation figurative issue d'une autre situation connue totalement différente. C'est pour cela que DL a passé un temps plus long que BN avant de comprendre comment fonctionne la canette. Pour DL, c'est l'objet concret, le composant matériel de l'échangeur, qui est impliqué dans le phénomène. Il ne peut

penser le fonctionnement de la canette qu'en l'assimilant à un petit réfrigérateur qui doit disposer des mêmes composants. Il se focalise sur un composant en particulier : le détendeur. Il assimile la valve de la canette à un détendeur. Il approfondit le fonctionnement du détendeur en le rapprochant de la valve dont il étudie le fonctionnement en le comparant à celui des valves qu'il connaît, notamment celui de la valve de vélo. Sa représentation résiste longtemps à toutes les contradictions objectives exprimées par ses collègues. On peut le comprendre parce qu'il ne dispose que de cette ressource pour aborder la situation nouvelle. Ce n'est que lorsqu'il transforme le détendeur en détente qu'il passe du registre figural au registre conceptuel. La transformation de la détente en dépression, se fait ensuite sans trop de difficulté et assez rapidement.

2.3.3. Nature et fonction des concepts chez PA :

PA n'aborde pas cet APP la tête vide. Pour l'évaporation, elle dispose d'une représentation issue de la situation quotidienne. Cette représentation constitue un concept *outil* lié à la situation quotidienne. Comme elle ne dispose pas d'un modèle d'une situation connue pour aborder la situation nouvelle, ce concept *outil* ne va pas l'aider à comprendre comment s'effectue l'évaporation dans la canette.

Elle construit d'abord le concept scientifique de vaporisation et de changement de phase. Ce concept est considéré dans sa fonction *objet*. En tant que concept *objet*, elle retient qu'un changement de phase se fait pour une température donnée et pour une pression correspondante, d'une part, et par un apport de chaleur, d'autre part. Autrement dit, elle apprend les relations particulières entre les trois variables qui définissent le concept. Ces variables constituent elles-mêmes des concepts. On a vu que ses conceptions de la chaleur, de la pression et de la température ne sont pas au point non plus. Elle a appris que la chaleur n'est pas la température et que la chaleur ne provoque pas toujours une augmentation de la température. Mais ce sont des concepts qu'elle est incapable de mettre en jeu dans le réel, ce qui complique pour elle la compréhension de l'évaporation dans la canette. Autrement dit, elle a acquis le concept d'évaporation dans sa fonction *objet*, mais elle a des difficultés à le mobiliser dans la situation de la canette. Le concept dans sa fonction *objet* n'opère pas dans le réel.

Par ailleurs, le concept *outil* dont elle dispose n'a pas pu se transformer en un autre concept *outil* en passant par le concept *objet*.

2.3.4. Nature et fonction des concepts chez DM :

DM est dans le même cas que PA. On a vu que c'est le seul élève du groupe qui maîtrise le concept de chaleur dans sa dimension microscopique. Il a aussi appris le concept d'évaporation dans sa fonction *objet*. Lorsqu'il tente de mettre en jeu le concept *objet* de l'évaporation dans le fonctionnement de la canette, il n'y arrive pas. DM conçoit que la chaleur augmente la température. Ce qui l'empêche de construire le concept *outil* de l'évaporation.

2.4. Passage d'une fonction du concept à l'autre :

2.4.1. Passage d'un concept *outil* ancien à un concept *outil* nouveau :

Ce cas est illustré par BN et DL qui ont appris par la situation et qui ont mobilisé des concepts *outils*.

2.4.1.1. Le cas BN :

Reprenons les trois principaux concepts *outils* que BN a mobilisé : l'évaporation, le transfert thermique et l'adsorption. Les deux premiers concepts *outils* qu'il mobilise dans la canette, sont construits à partir des concepts *outils* mobilisés dans le réfrigérateur. Il a transformé ces trois concepts *outils* pour les adapter à la situation de la canette. A l'arrivée, les concepts *outils* mobilisés dans la situation de la canette sont différents de ceux mobilisés dans la situation du réfrigérateur. Autrement dit, on peut construire un concept *outil* nouveau à partir d'un concept *outil* ancien. Le concept d'adsorption mobilisé dans la canette est aussi un concept *outil* issu des situations de lutte contre l'humidité. Dans la situation de la canette, ce concept *outil* n'est pas utilisé pour lutter contre l'humidité. La fonction d'adsorption de lutte contre l'humidité est exploitée dans la fonction de complément au transfert thermique et au stockage de l'énergie.

2.4.1.2. Le cas DL :

DL est un cas très intéressant, dans la mesure où il illustre le passage d'une pensée d'un technicien à celle de l'ingénieur. Dans son activité quotidienne, un technicien est généralement en prise directe avec le monde concret qu'il manipule. Il est plus imprégné par les objets concrets que celui qui les considère à distance. Cela ne signifie pas qu'il n'est pas capable de concevoir des objets. Mais sa conception sera plus influencée par cette dimension concrète de l'objet. Dans le premier groupe deux élèves, ML et DL, tous deux techniciens, s'interrogent plus sur la fabrication de l'objet que sur les phénomènes en jeu dans son fonctionnement. Ils ont passé beaucoup de temps à s'interroger sur l'emboutissage, sur les techniques de réalisation du vide dans la canette et sur la manière dont les éléments ont été assemblés. Ils ont une approche de la conception de l'objet qui part de sa forme et de sa

géométrie. DL tout particulièrement part des composants de l'objet. Son analogie n'est pas vraiment conceptuelle comme c'est le cas pour BN. Son MO est dominé par l'aspect figuratif. Sa représentation du réfrigérateur est plutôt figurative.

Bien entendu, nous n'avons accès à cette représentation que par le biais de ses énoncés. Or, un énoncé est loin d'épuiser cette représentation dans son contenu (Pastré, 1994). Seulement, cette représentation est mise en œuvre dans l'explication d'un système. On a accès également à son aspect opératif. Ces deux aspects sont solidaires l'un de l'autre (Piaget, 2005).

2.4.2. Passage du MO initial au MO nouveau :

On peut étendre le passage d'un concept *outil* initial à un concept *outil* nouveau au passage d'un MO initial à un nouveau MO. Lorsque BN mobilise son MO du réfrigérateur, il mobilise toute une structure conceptuelle personnelle du fonctionnement du réfrigérateur. Dans un MO il n'y a que des concepts *outils* puisque ce sont des concepts qui opèrent dans une situation. Ces concepts *outils* entretiennent des relations de dépendance entre eux dans le MO. Lorsqu'un concept *outil* est transformé toute la structure conceptuelle dont il est issu est transformée. Le résultat est un MO nouveau adapté à la situation nouvelle. La transformation se réalise dans le dialogue entre le MO analogique et la situation nouvelle.

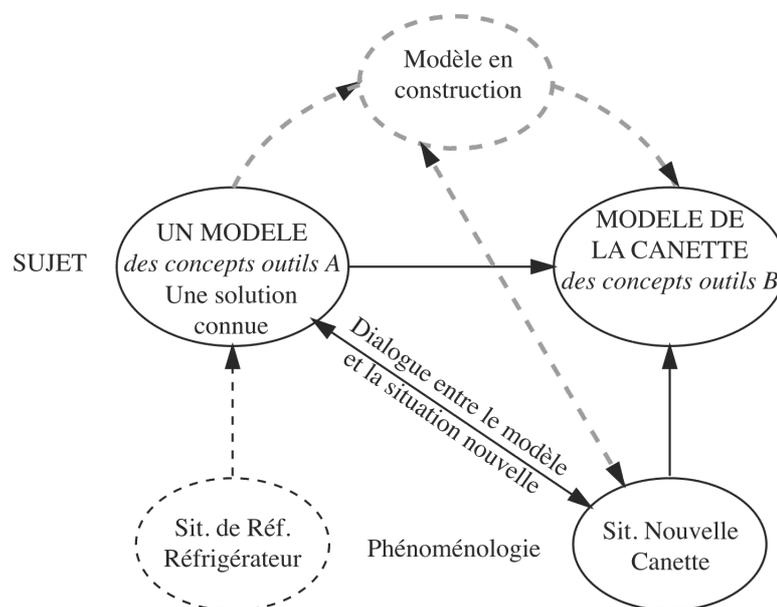


Figure 26. Processus de transformation du modèle initial mobilisé

BN transforme progressivement son concept *outil* d'évaporation, en prenant en compte la transformation du concept *outil* du transfert thermique. Même lorsqu'il semble focalisé uniquement sur l'évaporation, il mobilise immédiatement après ces deux concepts ensemble dans une explication du fonctionnement de la canette. La transformation du MO du réfrigérateur introduit le nouveau concept d'adsorption pour construire le MO complet de la canette. Ce qui indique que la transformation d'un MO initial pour l'adapter à une situation

nouvelle ne se limite pas à la transformation des concepts *outils* existants. Elle peut se réaliser par l'introduction de nouveaux concepts *outils*. La transformation du modèle initial s'effectue par des reconfigurations successives de l'ensemble des concepts *outils*.

2.4.3. Passage de la fonction objet à la fonction outil :

Ce cas est illustré par PA et DM qui ont appris par le texte des concepts dans leur fonction *objet*.

Reprenons le cas de PA qui a appris le concept *objet* d'évaporation. Elle est capable d'énoncer la définition de ce concept sans se tromper. Mais, lorsqu'elle tente de comprendre comment s'effectue l'évaporation dans la canette, elle ne sait pas comment l'utiliser. Elle revient à sa conception quotidienne de l'évaporation. Ce qu'elle sait au départ de l'évaporation dans le réel, c'est qu'elle s'effectue par un apport de chaleur. Dans ce cas la représentation qu'elle a de l'évaporation correspond à un concept *outil*. Il y a un décalage entre le concept *objet* appris et le concept *outil* dont elle dispose.

Il a fallu l'intervention de l'enseignante avec son analogie proportionnelle pour qu'elle comprenne comment se produit l'évaporation dans la canette. Par cette analogie proportionnelle elle a plutôt transformé un concept *outil* lié à la situation quotidienne en un nouveau concept *outil* lié à la situation nouvelle. Dans sa conception quotidienne de l'évaporation elle ne prend pas en compte la pression. L'analogie proportionnelle lui a permis de prendre conscience de l'intervention de la pression dans ce phénomène. Le fait de ne pas tenir compte de l'intervention de la pression dans la représentation du phénomène d'évaporation dans les situations quotidiennes est assez courant. On est tellement adapté à la pression atmosphérique qu'on oublie son intervention dans ce phénomène parce qu'on ne le perçoit plus.

L'analogie proportionnelle consiste à identifier la relation entre deux variables pertinentes dans le phénomène et à leur affecter des valeurs. Connaissant trois valeurs, il faut trouver le quatrième terme.

La relation est celle qui lie la pression à la température. Dans l'analogie proposée par l'enseignante cette relation est implicite. Partant de là, si dans la situation quotidienne la température est à 100° pour une pression atmosphérique, pour une température ambiante (basse par rapport à 100°) la pression doit être basse. On peut se demander pourquoi PA n'a pas augmenté la pression. C'est la règle de la proportionnalité. Quand on baisse d'un côté on n'augmente pas de l'autre. N'oublions pas que les élèves maîtrisent les règles de calcul.

PA n'a pas pu transformer directement son concept *objet* en un concept *outil*. Il a fallu qu'elle repasse par son concept *outil* lié à une situation quotidienne pour en construire un nouveau lié

à la situation de la canette. Du coup, l'analogie proportionnelle lui a permis d'illustrer le concept *objet* d'évaporation. Car PA sait que la pression intervient dans l'évaporation, d'une part, et que lorsque la pression varie d'une situation à l'autre, la température la suit et inversement.

2.4.4. Passage de la fonction outil à la fonction objet :

Comme nous venons de le voir pour PA, ce passage s'est effectué par une généralisation en ce qui concerne l'évaporation. Cette généralisation lui a permis de comprendre et de construire le concept général de vaporisation dans sa fonction *objet*.

Pour BN ce fut un passage difficile parce que le concept *outil* construit demeure lié aux autres concepts *outils* dans son MO. Pour expliquer l'évaporation dans la canette il procède par séquence et fait varier à chaque séquence soit la température soit la pression. Englué dans le réel c'est son MO qui fonctionne. Il aborde l'apprentissage du concept *objet* avec son MO. Il faut qu'il prenne de la distance par rapport à ce réel pour pouvoir réfléchir sur ce qu'il a construit. Cette prise de distance n'est possible que lorsqu'il sera débarrassé des contraintes de la production (Pastré, 1999). Or il n'a pas eu le temps. L'enseignante l'a poussé à construire le concept *objet*. Selon l'enseignante, le passage du concept *outil* au concept *objet* est évident et ne pose aucun problème. Ce point de vue rejoint celui de Douady qui pense que le plus difficile est la construction du concept *outil*. Le passage du concept *outil* au concept *objet* se fait naturellement et sans difficulté. Or pour BN ça n'a pas été le cas. Ce qui a été difficile à comprendre pour BN pour construire le concept *objet* de vaporisation et de changement de phase c'est le concept du couple pression-température. Il ne sait pas ce qui varie et ce qui reste constant. Avec l'aide de sa collègue VA, qui a appris le concept *objet* de vaporisation, il va rectifier son erreur. Mais lors de la restitution du travail il reprend son concept *outil* et fait varier la pression en maintenant la température constante. On a l'impression que pour DM, l'apprentissage de la théorie et celui du réel (ou des situations) se font séparément. Ce qui rappelle la distinction que fait Tiberghien entre le monde scolaire et le monde quotidien (Recherche en cours de publication). On peut apprendre un concept objet, le mobiliser dans un discours, se servir d'une situation pour l'exemplifier, et ne pas être capable de l'utiliser dans une situation réelle complexe.

2.4.5. Conclusion :

Il y a des passages réussis :

– Entre la fonction *objet* et la fonction *outil* : c'est le cas pour le concept d'adsorption pour BN, PA et DM ;

– Entre la fonction *outil* et la fonction *objet* : c'est le cas pour le concept de vaporisation pour BN qui a réussi à énoncer le concept objet de vaporisation. Mais nous avons vu que lorsqu'il va utiliser ce concept objet dans le fonctionnement de la canette il revient à son concept outil élaboré à partir de la situation.

Il y a des passages non réussis :

– C'est le cas pour le concept de couple pression-température chez BN. Il a appris le concept dans sa fonction *objet*, mais lorsqu'il le mobilise pour expliquer le fonctionnement de la canette, il y a un décalage entre son concept *outil* (il fait varier la pression et la température) et le concept *objet*. Il revient alors au concept *outil* construit dans l'apprentissage par la situation.

– C'est le cas pour le concept de vaporisation en sens inverse chez DM. Il a aussi appris le concept dans sa fonction *objet*. Mais lorsqu'il le mobilise comme concept *outil* dans la canette il ne comprend pas comment l'évaporation peut se réaliser sans augmentation de température.

– C'est le cas de PA qui a appris le concept de vaporisation et de changement de phase mais qui n'a pas été capable de les utiliser pour concevoir l'*objet* technique. Il y a eu exemplification du concept pour lui donner un sens, mais la compréhension du concept *objet* n'a pas permis de comprendre l'*objet* technique. Le passage du concept *objet* au concept *outil* n'a pas réussi.

3. Les misconceptions :

Il y a eu donc des passages réussis et des passages non réussis, d'un concept *outil* à un autre concept *outil*, d'un concept *outil* à un concept *objet* et d'un concept *objet* à un concept *outil*. Aucun passage ne s'est effectué sans difficultés. Celles-ci sont dues à des erreurs commises par les élèves au cours de leur apprentissage révélées par des contradictions. Nous allons aborder ces erreurs en termes de misconceptions, c'est-à-dire en termes d'obstacles épistémologiques locaux relevant d'un champ conceptuel particulier : le champ de la thermodynamique et plus particulièrement celui des changements de phase, en prenant la précaution de ne pas considérer toutes les misconceptions apparues lors de cet apprentissage comme de véritables obstacles épistémologiques. Celles qui apparaissent lors d'un apprentissage et qui disparaissent à la fin ne constituent pas des obstacles épistémologiques. Seules les misconceptions qui persistent à la fin de l'apprentissage constituent les véritables

obstacles épistémologiques. Ces misconceptions sont récurrentes. Elles ont la caractéristique de disparaître et de réapparaître.

Nous distinguerons les misconceptions qui portent sur les concepts *outils* de celles qui portent sur les concepts *objets*. La distinction *outil/objet* permet de distinguer les misconceptions en jeu dans la conception de l'*objet* technique et les misconceptions en jeu dans la construction des concepts scientifiques. Les misconceptions dans la conception de l'*objet* technique sont celles qui portent sur les concepts *outils* et les raisonnements mobilisés⁶⁰. La distinction entre les concepts et les raisonnements n'est que d'ordre méthodologique. Dans les faits, un concept participe au raisonnement et celui-ci participe à l'élaboration d'un concept. Une misconception portant sur le raisonnement affecte la conception élaborée et une misconception portant sur le concept affecte le résultat d'un raisonnement. C'est ainsi par exemple, qu'un raisonnement correct peut produire un résultat fallacieux parce qu'une prémisse est fondée sur un concept erroné. Cette distinction permet d'identifier à quel niveau se situe la vraie misconception dans la conception qui découle de l'ensemble : des concepts et du raisonnement qui les mobilisent.

Dans le groupe 2, la plupart des élaborations des élèves ne sont pas des misconceptions. Ce sont des élaborations conjoncturelles qui résultent du tâtonnement, qui ne se raccrochent à aucune connaissance de l'élève et qui disparaissent rapidement.

Nous ne reprendrons pas toutes les misconceptions apparues chez tous les élèves au cours de cet apprentissage. Elles sont très nombreuses. Nous nous limiterons à quelques unes pour illustrer notre propos.

Nous adoptons ici une posture particulière qui consiste à considérer les misconceptions comme des ressources et non systématiquement comme des obstacles épistémologiques tant que le processus d'apprentissage n'est pas achevé. Nous distinguerons donc dans les misconceptions trois types :

- les provisoires qui disparaissent à la fin de l'apprentissage ;
- celles qui persistent ;
- celles qui cohabitent ou demeurent sous-jacentes à un concept correctement construit.

Dans les misconceptions provisoires nous ajouterons un autre type, qui se distingue des trois premiers, celui qui donne lieu à un concept inabouti ou immature.

Toutes ces différentes misconceptions portent sur le concept *outil*, le concept *objet* ou sur le raisonnement.

60 - Le raisonnement apparaît lorsque le concept est utilisé dans sa fonction outil. Lorsqu'on apprend un concept objet en tant que concept appartenant à un savoir constitué on le prend tel qu'il est. Lorsqu'on essaie de l'éprouver, de vérifier sa validité ou de le tester on l'utilise dans sa fonction outil.

Nous considérons également les misconceptions comme un passage obligé caractéristique de l'activité cognitive au cours d'un apprentissage, notamment celles qui portent sur les raisonnements. Par exemple, tous les raisonnements intermédiaires sur un système constituant, du point de vue du fonctionnement cognitif, des étapes intermédiaires nécessaires avant d'aboutir au raisonnement systémique, lorsque le sujet est confronté à une situation nouvelle. Il en est de même pour les concepts. On peut commencer un apprentissage avec un concept erroné et finir avec un concept correctement défini. Ajoutons à cela que dans tous les apprentissages il y a des erreurs et on apprend par ces erreurs.

3.1. Les misconceptions qui portent sur les concepts dans leur fonction outil et objet :

3.1.1. Les misconceptions qui disparaissent :

3.1.1.1. Le concept d'évaporation chez BN :

On peut noter deux misconceptions évidentes chez BN : il conçoit au départ que les propriétés intrinsèques du fréon déterminent l'évaporation à basse température, et que celles de l'eau ne lui permettent pas de s'évaporer à moins de 100°.

Ces deux misconceptions portent sur le concept *outil* d'évaporation, elles ont totalement disparu à la fin, mais d'autres liées à l'évaporation sont apparues : par exemple la variation de la pression et de la température au cours de ce changement de phase. Ainsi une misconception peut remplacer une autre.

Dans ces deux conceptions de l'évaporation, BN ne prend pas en compte les conditions de pression et de température. Il ne tient compte que de l'apport de chaleur. La conception de l'évaporation qu'il développe, pour remplacer les deux précédentes, établit une relation de dépendance entre les trois variables : la pression, la température et la chaleur.

Comme on l'a vu, BN va apprendre le concept *objet* de vaporisation et de changement de phase, mais il a du mal au début à le comprendre. Il ne saisit pas ce qui varie et ce qui demeure constant dans les variables qui constituent ce concept : la pression, la température ou le couple qu'elles forment. Il fait varier la pression et la température et maintient le couple constant. Cette conception de l'évaporation constitue une misconception. Suite aux explications de sa collègue VA, qui a bien acquis ce concept, il comprend que dans une même situation la pression et la température demeurent constantes et le couple qu'elles forment varie d'une situation à l'autre. Il donne des exemples qui indiquent qu'il a bien compris ce concept *objet*. Cette misconception qui porte sur le concept *objet* disparaît.

3.1.1.2. Le concept de transfert thermique chez BN :

BN dispose au départ du concept de transfert thermique dans ses deux fonctions, *outil* et *objet*. La disposition de ce concept dans sa fonction *objet* se note dans la définition de la chaleur qu'il énonce notamment à son collègue DL. La disposition de ce concept dans sa fonction *outil* se note dans la présentation de son MO du réfrigérateur. BN maîtrise bien ce concept *outil* dans les deux modes de transfert thermique en jeu dans le réfrigérateur : la conduction et la convection. Mais ce concept outil qui est valable du point de vue de BN dans la situation du réfrigérateur, se révèle inadapté dans la situation de la canette. Ce concept *outil* constitue une misconception provisoire dans la conception du transfert thermique dans la canette. Cette misconception disparaît à la fin.

3.1.1.3. Le concept d'adsorption chez BN :

Le concept d'adsorption est construit par BN en trois étapes, dans sa fonction *outil* et dans sa fonction *objet*, par la combinaison d'un apprentissage par la situation et d'un apprentissage par le texte.

BN ne connaît pas le mot « adsorption » mais il connaît le phénomène (il intervient dans la lutte contre l'humidité). Autrement dit, il dispose du concept sans étiquette, c'est-à-dire sans un signifiant pour l'exprimer. Il considère au début l'adsorption comme une propriété du dessicant qui consiste à capter l'humidité en l'attirant. Dans la canette, le dessicant attire la vapeur produite. Ce concept est donc considéré dans sa fonction *outil*. Cette première conception n'est pas erronée, elle est incomplète, inaboutie et/ou immature.

A la première phase de l'apprentissage, elle constitue une misconception provisoire de l'adsorption telle qu'elle s'effectue dans la canette.

Elle constitue également une misconception provisoire dans la conception du transfert thermique. Celui-ci se réalise dans la canette par l'adsorption en attirant la vapeur.

Ensuite, il découvre que le dessicant est une matière proche de l'argile dont la structure est alvéolaire. L'humidité se loge dans ces alvéoles sous forme liquide. BN estime que la vapeur est transformée en liquide pour pouvoir se loger dans les alvéoles. Cette conception constitue une seconde misconception provisoire de l'adsorption. Et également, une seconde misconception provisoire dans la conception du transfert thermique. BN pense toujours que l'adsorption est impliquée, dans le transfert thermique, en capturant la vapeur.

La troisième étape passe par la construction du concept *objet* de l'adsorption dans un apprentissage par le texte.

3.1.1.4. Le concept objet d'adsorption chez BN :

Au départ, le concept *objet* d'adsorption est obtenu par les dictionnaires usuels. Le concept *objet* obtenu constitue une *misconception* provisoire. C'est un concept *objet* inabouti ou incomplet.

BN apprend, par le texte, que dans le phénomène de l'adsorption, interviennent des forces de van der Waals qui fixent les molécules d'eau par un mécanisme électrostatique.

La *misconception* initiale liée à la fonction *objet* du concept a disparu.

3.1.1.5. Le concept d'adsorption chez PA :

Au départ, PA ne connaît ni le terme « adsorption » ni le phénomène qu'il désigne. Elle accède à ce concept dans sa fonction *objet* par la définition donnée, dans le dictionnaire usuel. Cette définition, lui donne une idée approximative du phénomène. Elle ne lui permet pas de le comprendre scientifiquement. La représentation provisoire que se construit PA à partir de cette définition constitue une *misconception* provisoire de l'adsorption.

Elle transforme cette représentation provisoire de l'adsorption en un concept *outil* en la mobilisant dans la canette. Toutes les conceptions successives qu'élabore PA au cours de son apprentissage de ce concept *outil* de l'adsorption constituent des *misconceptions* provisoires jusqu'au moment où elle accède à la définition scientifique de l'adsorption, notamment en précisant qu'elle est le fait des forces de van der Waals. Elle construit alors le concept *objet* complet. La *misconception* provisoire du départ disparaît.

Elle mobilise ce concept dans la canette et transforme le concept *objet* acquis en un concept *outil* lui permettant d'expliquer l'adsorption dans la canette. La *misconception* du départ liée au concept *objet* et au concept *outil* disparaît.

3.1.1.6. Concept objet d'évaporation chez PA :

La conception de l'évaporation dont dispose PA au départ est issue de son expérience quotidienne où elle conçoit qu'elle se réalise par un apport de chaleur. Dans cette conception elle ne prend pas en compte les conditions de pression et de température. Cette conception quotidienne constitue une *misconception*.

L'enseignante et les textes écrits lui apportent la définition du concept d'évaporation.

PA reprend cette définition dans différents énoncés sans comprendre comment l'évaporation se produit dans le réel, notamment dans la canette. Elle acquiert les conditions d'évaporation et par la même occasion celles qui régissent tout changement de phase.

L'analogie proportionnelle, lui permet de comprendre comment se réalise une évaporation. Dans cette analogie, l'application du concept *objet* au réel consiste à affecter des valeurs aux variables. Dans la construction du concept *objet* de l'évaporation, la *misconception* disparaît.

3.1.1.7. Concept de vide chez PA :

Au début le vide dans la canette correspond pour PA à une absence totale de pression. Ce qui correspond à un concept *outil*. Cette conception du vide dans la canette constitue une *misconception*.

La documentation technique l'informe que le vide n'est pas total dans la canette. Le vide dans la canette est alors interprété comme une basse pression. La *misconception* initiale disparaît à la fin puisqu'elle ne l'évoque plus. A la quatrième séance, elle utilise la basse pression à la place du vide ou parle de pression sous vide, lorsqu'elle explique la vaporisation.

3.1.2. Les misconceptions qui persistent :

3.1.2.1. Le concept outil de couple pression-température chez BN :

BN a construit au cours de son apprentissage le concept *outil* d'évaporation en établissant une relation de dépendance entre les trois variables : la pression, la température et la chaleur. C'est au niveau de cette relation de dépendance que se situe la *misconception* qui porte sur le concept *outil* élaboré. On a vu ci-dessus, que BN a bien acquis le concept *objet* de vaporisation. Mais lorsqu'il mobilise ce concept d'évaporation dans la canette, BN ne peut concevoir cette évaporation qu'en faisant varier la pression et la température. Il a des difficultés à concevoir ces deux variables comme un couple. Autrement dit, il a des difficultés à comprendre que dans la situation de la canette, la pression d'évaporation et la température d'évaporation demeurent constantes.

Cette *misconception* portant sur le concept *outil* de couple pression-température persiste.

Nous pensons que le concept *outil* d'évaporation ne correspond pas chez BN à une application du concept *objet* acquis. Il résulte du développement de ce concept dans sa fonction *outil* dans la confrontation à la situation nouvelle.

3.1.2.2. Le concept de chaleur chez PA :

PA utilise les termes de chaleur et de calories comme synonymes. Elle les utilise pour expliquer les phénomènes thermiques, sans les distinguer. Ces deux concepts sont utilisés dans leur fonction *outil*. Pour elle, les calories ou la chaleur se transportent, se déplacent ou elles sont extraites. Pour le transport des calories ou de la chaleur, le véhicule est la vapeur. La conception que PA a de la chaleur ou des calories constitue une *misconception*.

L'enseignante explique le concept de chaleur et précise qu'il faut parler de chaleur et non de calorie. PA substitue le terme de chaleur à celui de calorie. Mais le concept reste le même.

Autrement dit, elle apporte une modification au signifiant, sans changer de signifié. Elle n'aborde la chaleur qu'en tant que quantité.

Sa conception de la chaleur constitue une misconception qui porte sur le concept dans ses deux fonctions *outil* et *objet*.

Dans sa fonction *objet*, PA n'arrive pas à comprendre la dimension microscopique de la chaleur et ne la définit pas comme un transfert d'énergie. Cette misconception persiste.

Cette conception de la chaleur constitue une misconception au concept de transfert thermique dans sa fonction *outil*, c'est-à-dire tel qu'il se produit dans la canette.

Cette misconception persiste.

3.1.2.3. Le concept de chaleur en tant que variable dans l'évaporation chez PA :

PA a acquis le concept *objet* d'évaporation. Elle sait le définir correctement. La chaleur est l'une des variables de ce concept. Elle ne sait pas comment intervient la chaleur dans l'évaporation. Or ce concept de chaleur constitue une misconception sous-jacente au concept d'évaporation correctement acquis. Cette misconception persiste chez PA. Ainsi on peut construire un concept et le définir correctement avec une misconception sous-jacente portant sur l'un des concepts qui le constitue. Le concept de chaleur est une misconception qui cohabite avec le concept objet d'évaporation.

3.1.2.4. Le concept outil de l'évaporation chez PA :

PA applique d'une manière rigide le concept *objet* d'évaporation acquis dans la canette. Elle est en mesure d'expliquer l'évaporation dans la canette en affectant des valeurs aux variables. Mais lorsqu'elle mobilise ce concept dans le fonctionnement de la canette, elle n'arrive pas à comprendre comment la dépression intervient dans l'évaporation. Elle n'arrive pas à adapter l'évaporation aux interactions avec les autres phénomènes (effet de la dépression par exemple). Le concept *objet* fait obstacle au concept *outil*. Sa manière d'appliquer le concept *objet* au réel constitue une misconception. L'application d'un concept au réel ne consiste pas juste à affecter des valeurs aux variables. Cette misconception persiste. Elle cohabite avec un concept correctement acquis. Les misconceptions qui cohabitent posent un problème dans leur utilisation dans leur fonction outil. Lorsque PA utilise ce concept d'évaporation, la misconception sous-jacente relative à la chaleur lui pose un problème pour expliquer le transfert thermique.

3.1.2.5. Le concept de vide chez DM :

On a vu que DM considère, au début, que le vide est total ou absolu dans la canette. Ce qui constitue une misconception provisoire du concept de vide dans ses 2 fonctions *objet* et *outil*. Cette conception du vide le conduit à distinguer l'état sous vide de l'eau de son état sous basse pression (G2S20340). Cette distinction constitue une misconception provisoire qui porte aussi sur le concept *outil*, lorsque le texte lui apprend que le vide n'est pas total dans la canette. Les misconceptions qui portent sur le concept *outil* disparaissent. Par contre la misconception liée à la fonction *objet* du concept de vide persiste, car il n'a pas eu accès à la définition du vide en physique.

3.1.2.6. La relation chaleur température dans l'évaporation chez DM :

DM part d'une relation de détermination entre la chaleur et la température qui ne constitue pas en tant que telle une misconception systématique en physique. La chaleur provoque une augmentation de la vapeur. Cependant, il y a une exception à cette loi : lors d'un changement de phase la chaleur ne provoque pas d'augmentation de la température⁶¹. Nous sommes en présence d'un cas où un concept dans ses deux fonctions, *objet* et *outil*, correct dans un contexte, constitue une misconception dans un autre contexte.

Cette relation telle que DM la conçoit constitue une misconception dans la construction du concept d'évaporation et de changement de phase, d'une part, et dans la conception de l'*objet* technique, d'autre part. La relation de détermination qu'il établit entre, la chaleur et la température, fait obstacle à la compréhension du concept de changement d'état dans sa fonction *outil*. Cette misconception persiste.

3.2. Les misconceptions qui portent sur les raisonnements :

Les raisonnements observés sont des raisonnements spontanés (Closset, Viennot) qui constituent des misconceptions, par rapport à un raisonnement systémique. S'ils disparaissent à la fin, ils ne constituent pas véritablement des obstacles épistémologiques. On peut les considérer, dans ce cas, comme des raisonnements intermédiaires, qui constituent un passage obligé caractéristique de l'activité cognitive lorsqu'on est confronté à un système complexe inédit. Ils participent à la construction de la représentation systémique d'une situation. S'ils persistent, ils constituent, dans ce cas, de véritables obstacles épistémologiques. En tant que misconceptions, on peut les considérer comme des misconceptions provisoires lorsqu'elles disparaissent à la fin, et comme des obstacles épistémologiques locaux propres à un champ conceptuel, lorsqu'elles persistent à la fin d'un apprentissage.

61 - L'énergie thermique transmise au fluide se manifeste dans son état transformé en vapeur ou en gaz, et n'affecte pas la température du fluide lui-même, celle-ci demeure constante.

Nous avons relevé trois types courants de raisonnements que mobilisent les élèves dans la conception du fonctionnement de la canette : le raisonnement séquentiel, le raisonnement linéaire-causal et le raisonnement à variables réduites.

3.2.1. Les différents types de raisonnement observés :

3.2.1.1. Le raisonnement séquentiel :

Le raisonnement séquentiel consiste à découper un système en séquences qui sont cloisonnées et considérées l'une indépendamment de l'autre sans tenir compte des relations qui existent entre elles. Celles-ci constituent elles-mêmes des séquences indépendantes. Le système de la canette est étalé sur un plan linéaire et découpé en cinq séquences.

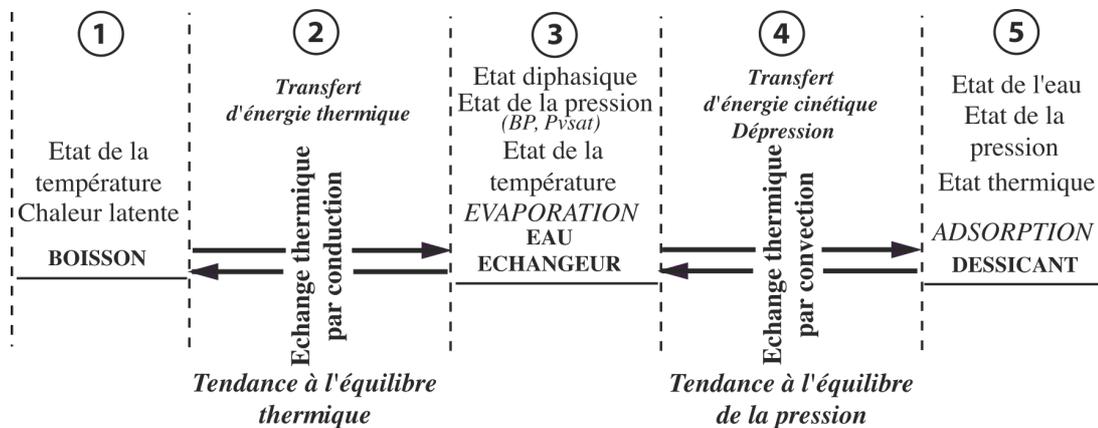


Figure 27. Schéma des séquences du système de la canette

3.2.1.2. Le raisonnement linéaire causal :

Ce raisonnement consiste aussi à étaler le système sur un plan linéaire et à établir des relations de causalité entre les variables et les états de la matière. Ces relations de causalité peuvent se situer localement dans une seule séquence, couvrir quelques séquences ou l'ensemble des séquences.

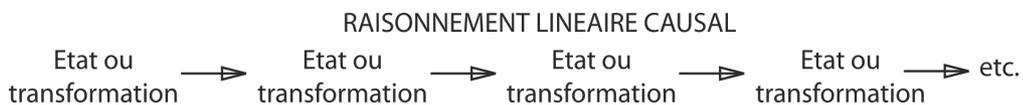


Figure 28. Les enchainements des causalités dans un raisonnement linéaire

3.2.1.3. Le raisonnement à variables réduites :

Lorsqu'il y a plusieurs variables en relation, ce raisonnement consiste à ne prendre en compte que deux variables au plus, dans une relation de causalité : la variable déterminante et la variable déterminée. Le fait de prendre en compte une seule variable déterminante ne signifie pas systématiquement que l'élève n'a pas conscience de l'existence d'une autre variable

déterminante. Cela peut parfois être le cas. Mais le plus souvent, l'élève choisit délibérément de ne considérer l'effet que d'une seule variable dans la relation de détermination dans un raisonnement, et l'effet d'une seule autre variable dans un raisonnement ultérieur.

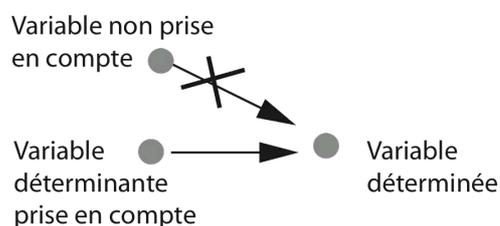


Figure 29. Prise en compte d'une seule variable déterminante

Ces trois raisonnements sont mobilisés par les élèves dès la première séance. Ils les alternent dans leurs cheminements. Souvent, ils commencent par un raisonnement séquentiel et le font suivre par le raisonnement linéaire causal lorsqu'ils tentent des hypothèses globales portant sur le fonctionnement du système dans sa totalité. Dans le raisonnement séquentiel, ils introduisent le raisonnement à variables réduites. C'est la raison pour laquelle, ils ne prennent jamais en compte, l'ensemble des éléments en jeu dans le système. Ces raisonnements constituent des misconceptions dans la conception de l'*objet* technique. Ils ne permettent pas de tenir compte : des effets rétroactifs, simultanés, paradoxaux et continus des phénomènes en jeu dans le système de la canette.

Cependant, ils constituent aussi des passages obligés pour concevoir un système. Ce sont des conceptions intermédiaires qui disparaissent normalement à la fin. Les raisonnements permettent parfois à l'élève d'identifier des contradictions, de les traiter et de les surmonter. Nous l'avons vu avec BN et PA lorsqu'ils évaporent totalement l'eau avant l'ouverture de la valve. Dans ce cas, les raisonnements constituent une ressource.

3.3. Les misconceptions qui portent sur les raisonnements dans le groupe 1 :

Nous présenterons uniquement ici le cas de BN qui, comme nous l'avons précisé, représente ce groupe1.

3.3.1. Le cas BN

Pour concevoir l'*objet* technique, BN a mobilisé divers raisonnements spontanés dont les trois principaux sont le raisonnement séquentiel, le raisonnement linéaire causal et le raisonnement à variables réduites.

Les trois premiers raisonnements sont mobilisés alternativement et dans le désordre.

Ces raisonnements sont contrôlés par son MO du réfrigérateur et ensuite par le MO de la canette en construction, lorsque le premier n'est plus évoqué, notamment à la quatrième séance.

Ces raisonnements constituent, au début, à l'échelle locale des misconceptions provisoires.

Le modèle global, qu'il a mobilisé lui a évité l'effet-obstacle que constituent ces raisonnements. Ce modèle a contrôlé tout le temps ses raisonnements. A chaque fois qu'il est sur une séquence, immédiatement après, il met en relation ce qu'il a élaboré dans cette séquence avec la séquence en amont et en aval, pour approfondir les phénomènes qui se produisent, en appliquant son modèle global.

Les misconceptions réapparaissent à chaque fois qu'il rencontre une nouvelle contradiction.

Il utilise le raisonnement séquentiel, pour approfondir les phénomènes qui se produisent dans une séquence ; le raisonnement à variables réduites, pour suivre l'effet d'une variable d'un bout à l'autre. Celui-ci apparaît souvent dans le raisonnement linéaire causal.

Le raisonnement linéaire causal chez BN, couvre toutes les séquences. Il lui permet d'articuler les séquences, les unes aux autres. C'est dans le raisonnement linéaire causal qu'on constate l'intervention de son MO du réfrigérateur. Dans les énoncés du début où il exprime ce raisonnement, il ponctue son propos par : « *c'est comme dans le frigo* ».

BN ne peut restituer verbalement l'explication du fonctionnement du système que par tranche. Chaque tranche d'explication insiste sur une ou plusieurs séquences. On note que l'articulation de ces tranches devient plus cohérente à la fin. En effet, à ce moment il ne bute plus sur des contradictions entre son explication et la situation nouvelle. Il commence à se sentir à l'aise pour donner cette explication en la formulant de différentes façons. Cette explication répond à toutes les questions qu'il s'est posé. Dans cette explication on note qu'il restitue l'essentiel des interactions entre les phénomènes en jeu dans la canette. Ce qui témoigne de l'achèvement de son approche systémique de l'objet.

Par une mise en intrigue on peut reconstituer son modèle de fonctionnement du système. Cela donne la description suivante du processus global :

« Au départ, les deux cavités sont sous vide.

Le fait qu'elle soit sous vide, l'eau s'évapore. On a de l'eau sous forme liquide et vapeur.

L'évaporation de l'eau augmente la pression.

On a une pression dans l'échangeur supérieure à la pression dans la cavité du dessicant.

L'action d'ouvrir la valve provoque une dépression.

La vapeur d'eau s'échappe en premier

La vapeur va être adsorbée par le dessicant.

La dépression entraîne une baisse de la pression dans l'échangeur.

Ce qui permet à l'eau liquide qui reste de continuer à s'évaporer.

L'évaporation a besoin d'énergie. Cette énergie est puisée à travers la paroi de l'échangeur dans la boisson. Celle-ci refroidit en cédant de l'énergie à l'eau pour l'évaporer. » (G1S41031, G1S41039, G1S41100, G1S41105, G1S41108, G1S41109).

Dans ces énoncés, BN évoque la continuité de l'évaporation. Il évoque également le double effet de la dépression : le transfert thermique dans le dessicant et l'évaporation de l'eau liquide qui reste dans l'échangeur thermique. Ce qui indique qu'il a accédé à une approche par système du fonctionnement de la canette.

Récapitulation des misconceptions chez BN :

	Concepts <i>outils</i>	Raisonnements	Concepts <i>objets</i>
Provisoires	Le vide Les ptés du fréon Les ptés de l'eau L'adsorption	Séquentiel Linéaire causal A vériables réduites (compris dans la version d'une variable cte)	Le vide L'adsorption La relation pression- température dans un changement de phase
Récurrentes	La relation pression- température dans un changement de phase		

3.4. Les misconceptions qui portent sur les raisonnements dans le groupe 2 :

Dans ce groupe, les élèves ont eux aussi, mobilisé les trois types principaux de raisonnement. Nous nous limiterons à présenter le cas de PA, qui semble représentatif de la manière dont les raisonnements ont été utilisés dans ce groupe.

3.4.1. Le raisonnement séquentiel chez PA :

PA n'aborde pas le système dans sa totalité, elle l'aborde par séquences ou groupe de séquences.

Les deux tableaux suivants donnent un aperçu sur cette approche du système par séquences au début et à la fin de l'apprentissage.

- Le raisonnement séquentiel au début :

Code énoncé	Séquences				
	1	2	3	4	5
(G2S10562) ⁶²				*	*
(G2S10769)	*		*		
(G2S10782)			*		
(G2S10804)		*			
(G2S10823)		*	*		
(G2S10825)	*	*	*	*	*

Dans les énoncés (G2S10562) (G2S10769) (G2S10782) (G2S10823) les séquences sont éparpillées.

Dans l'énoncé (G2S10825), où toutes les séquences sont présentes, PA mobilise le raisonnement linéaire causal.

- Le raisonnement séquentiel à la fin :

Code énoncé	Séquences				
	1	2	3	4	5
(G2S41214)		*		*	
(G2S41217)			*		
(G2S41219)				*	
(G2S41225)			*	*	
(G2S41382)		*	*		
(G2S41384)	*	*	*		
(G2S41386)		*	*		

Dans les trois derniers énoncés qui sont proches l'un de l'autre, (G2S41382) (G2S41384) (G2S41386), PA approfondit les séquences 2 et 3. On note aussi que les séquences qui apparaissent vers la fin de la quatrième séance sont éparpillées.

Si l'on considère la succession des énoncés, on notera que PA couvre toutes les séquences. Seulement, elle ne dispose pas d'un modèle global pour guider l'utilisation du raisonnement séquentiel. L'absence de modèle global, ne lui permet pas d'établir des relations de dépendance et d'interdépendance, entre les diverses séquences explorées à des moments différents.

62 - Pour le contenu des énoncés qui correspondent à ces séquences voir les *verbatim* en annexe 1 et 2.

Dans son itinéraire, on note qu'elle se déplace d'une séquence, ou groupe de séquences, à l'autre sans établir de liens entre les séquences, ou les groupes de séquences, précédentes.

Un déplacement est :

- une manière d'aborder la situation sous un angle différent ;
- provoqué par une contradiction au niveau local qu'elle n'arrive pas à surmonter au moment où elle apparaît ou par une impasse ;.
- induit par :
 - . L'interaction avec un collègue, qui reprend son hypothèse ou sa proposition sous l'angle qui l'intéresse au moment même, et donc l'entraîne vers sa préoccupation personnelle et la fait glisser vers une autre séquence ;
 - . Une information nouvelle, relevée par PA elle-même, ou apportée par un de ses collègues, qui intéresse une autre séquence.

On note qu'elle n'aborde parfois qu'une seule séquence, souvent deux séquences, et rarement trois ou quatre séquences et encore plus rarement cinq séquences. Le fait d'appréhender cinq séquences, ne signifie pas qu'elle prend en compte tous les aspects du système. Lorsqu'elle prend en compte les cinq séquences, elles les abordent superficiellement. Dans l'énoncé (G2S10825) où les cinq séquences sont évoquées, chacune d'elle est « effleurée » et non approfondie.

Le raisonnement sur les séquences ne lui permet pas de relever immédiatement toutes les contradictions. Certaines contradictions n'apparaissent que si elle établit des relations entre les séquences. L'exemple ci-dessous montre l'obstacle.

Énoncé 1 : L'ouverture de la valve provoque une dépression qui déplace la vapeur dans la cavité 3 du dessicant (G2S40694)

Énoncé 2 : La vapeur est aspirée par le dessicant (G2S40699)

Énoncé 3 : Ce n'est pas la dépression qui crée un changement d'état c'est la chaleur fournie par la boisson qui permet à l'eau liquide qui a dans l'échangeur de se transformer en vapeur (G2S41090)

Ces trois énoncés sont très proches. Dans le premier, la dépression déplace la vapeur dans la cavité du dessicant. Dans le second, ce n'est pas la dépression qui est en jeu dans le déplacement de la vapeur, c'est l'action du dessicant. Dans le troisième, la dépression a normalement un effet retour sur l'évaporation par une réduction de la pression, elle considère que ce n'est pas la dépression qui provoque l'évaporation, elle estime que c'est uniquement la chaleur qui crée un changement d'état de l'eau.

Ainsi, découper le système en séquence ne lui a pas permis de concevoir les effets conjugués de l'adsorption et de la dépression dans le déplacement de la vapeur, d'une part, et les effets conjugués de la dépression et de l'apport de chaleur dans l'évaporation, d'autre part.

Par ailleurs, pour les mêmes séquences, les phénomènes traités ne sont pas les mêmes.

Les mêmes séquences ne traitent pas des mêmes objets :

Dans les énoncés suivants, qui correspondent tous les deux aux séquences 3 et 4, ce n'est pas le même thème qui est traité

énoncé 1 : G2S40627-PA : et pour éviter qu'elles partent en même temps que la vapeur puisque en fait la vapeur part à une vitesse élevée, et bien ils sont mis un espèce d'entonnoir qui refait descendre les gouttelettes d'eau vers la cavité 2, , c'est ça hein GN ? C'est parce que en fait sous l'effet de la dépression la vapeur elle monte vachement vite

Enoncé 2 : G2S41100-PA : et le fait d'emmener la vapeur vers la cavité du dessicant, ça libère du volume

Ses deux énoncés sont sensiblement différents.

Dans le premier, elle évoque la dépression et la récupération des gouttelettes d'eau et non dans le second. Dans ce dernier, elle parle de volume libéré.

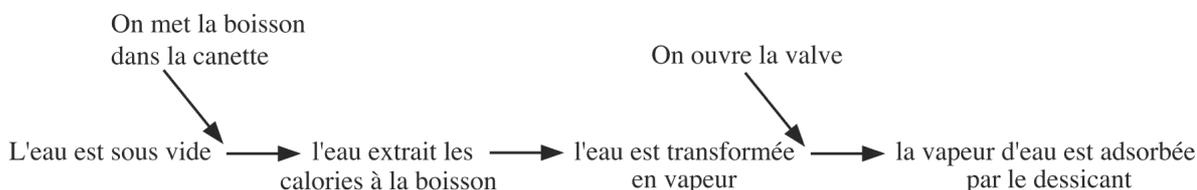
Dans le premier, la dépression est la cause du déplacement de la vapeur à grande vitesse. Dans le second, c'est l'ouverture de la valve qui provoque le déplacement de la vapeur. Les conceptions sous-jacentes à ces deux énoncés, si elles étaient combinées, gagneraient en précision. Mais chacune d'elles, correspond à une préoccupation du moment et à une élaboration différente.

Par ailleurs, lorsqu'elle prend en compte la totalité des séquences et établit des relations entre elles, le raisonnement ne prend pas en compte l'ensemble des éléments du système : Soit elle ne considère que des aspects généraux du système sans les préciser dans le détail, soit elle ne considère que les relations entre certaines variables, en particulier, dans chaque séquence en ignorant les autres, soit elle ignore les effets rétroactifs en établissant une chaîne linéaire de relation causales.

Elle a des difficultés à concevoir le cours du processus parce qu'elle ne conçoit celui-ci que sous forme de séquences.

3.4.2. Le raisonnement linéaire causal chez PA :

Dans l'énoncé suivant (G2S10675) elle établit des relations entre un état de l'eau, trois phénomènes et deux actions, que l'on peut représenter schématiquement de la manière suivante :



Ce type de raisonnement ne permet pas de concevoir les effets retour. Son raisonnement se termine par un résultat : « *la vapeur d'eau est adsorbée par le dessicant* ». Elle ne cherche pas à comprendre l'effet retour de l'adsorption sur le processus. Or dans la chaîne de causalité, chaque effet intermédiaire a des effets retour sur le processus : l'extraction des calories rafraîchit la boisson ; la vapeur produite a un effet sur la pression et sur le transfert thermique.

3.4.3. Le raisonnement à variables réduites chez PA :

Dans le raisonnement à variables réduites, il faut distinguer entre une réduction de variable pour réduire la complexité et l'acte de choisir une seule variable, en ignorant les autres, et de la considérer délibérément comme la variable déterminante dans le phénomène. Ce qui est la démarche de PA (G2S41079) (G2S41090).

Énoncé 1 : ah voilà ! Ce n'est pas l'énergie de la boisson c'est juste le fait de mettre sous vide qui a transformé l'eau (G2S41079)

Énoncé 2 : ce n'est pas la dépression qui crée un changement d'état c'est l'adsor... enfin c'est la chaleur fournie par la boisson qui permet à l'eau liquide qui a dans ta cavité 2 de se transformer en vapeur (G2S41090)

Dans le premier énoncé, elle fait dépendre l'évaporation de la mise sous vide de l'eau. On aurait tendance à croire qu'elle exclut l'intervention de l'énergie. Mais nous n'avons aucune preuve pour l'attester.

Dans son deuxième énoncé, le choix est délibéré parce qu'elle considère la dépression comme une variable qui n'a aucun rapport avec les autres variables (la pression et la température) qui interviennent dans l'évaporation.

Chez PA, ces misconceptions qui portent sur les raisonnements persistent à la fin, et constituent de véritables obstacles épistémologiques à la conception de l'objet.

Commentaire :

Généralement, tous les raisonnements mobilisés par les élèves sont considérés comme des raisonnements intermédiaires, qui disparaissent à la fin d'un apprentissage et qui peuvent réapparaître dans une situation nouvelle atypique. (Closset, 1983 ; Missonnier, 2002 ; Missonnier et Closset, 2004).

Nous avons observé que pour le groupe 1, représenté par BN, ces raisonnements ont disparu à la fin de l'apprentissage. Par contre pour le groupe 2, ces raisonnements persistent. On peut faire l'hypothèse suivante :

Lorsqu'on aborde une situation nouvelle et atypique avec un modèle analogique d'une situation connue, ces raisonnements disparaissent. Par contre, lorsqu'on ne dispose pas d'un modèle analogique pour aborder une situation nouvelle, ces raisonnements persistent. Ce qui module la thèse de Closset, 1983). La disparition de ces raisonnements n'est pas systématique.

Récapitulation des misconceptions chez PA :

Misconceptions	Concepts <i>outils</i>	Raisonnements	Concepts <i>objets</i>
Provisoires	Adsorption Vide		Adsorption Evaporation
Récurrentes	Chaleur Evaporation	Tous les raisonnements mobilisés	Chaleur
Cohabitent	Chaleur avec évaporation		Chaleur avec évaporation

4. En guise de conclusion

L'apprentissage par les situations est un apprentissage par les problèmes (APP). C'est un apprentissage au cours duquel on construit des concepts dans leur fonction outil. Un concept outil est l'instrument cognitif par lequel on pense la situation et l'action. Il vise prioritairement un but pragmatique. Le concept prend un sens par la situation qui a permis de le construire. Dans l'apprentissage par les situations, l'apprentissage d'une situation nouvelle consiste à transformer un concept outil ancien en un nouveau concept outil. Dans ce type d'apprentissage, le processus conduisant à la conception d'un objet technique consiste à transformer un concept outil dans sa relation aux autres concepts outils qui forment le modèle opératif de l'apprenant.

Il est possible de passer de la fonction outil à la fonction objet d'un concept. C'est la voie royale pour construire des concepts objets comme les concepts scientifiques. C'est ce que pensent Brousseau et Douady, et après eux Vergnaud et Pastré et tous les tenants de la conceptualisation dans l'action. Seulement ce passage ne s'effectue ni naturellement ni sans difficultés comme le pense Douady. Notre observation tend à infirmer sa thèse. Il ne peut se réaliser que sous certaines conditions.

La première condition est celle que suggère Brousseau. Il faut un temps pour apprendre en autonomie, sans l'aide de personne, en agissant soi-même sur la situation et en mobilisant ses propres ressources internes (action dans l'espace a-didactique). L'apprentissage se réalise lorsqu'on réussit à résoudre le problème que supporte une situation totalement inédite et suffisamment complexe. L'exemple d'une situation de ce type est celui donné par Vergnaud, avec la construction du triangle symétrique par rapport à un axe oblique pour construire le concept de symétrie. Ce concept construit s'inscrit dans le champ conceptuel des mathématiques. Nous avons un deuxième exemple avec la canette où les concepts de vaporisation et de changement de phase construits s'inscrivent dans le champ de la thermodynamique. Ce premier temps, correspond à une conceptualisation d'un premier niveau d'abstraction. Il faut un deuxième temps, au cours duquel se réalise une autre conceptualisation d'un niveau d'abstraction supérieur, lorsque l'apprenant est débarrassé des contraintes de la production (de la résolution du problème). Au cours de cette deuxième conceptualisation la médiation d'un tiers compétent est nécessaire (un mentor, un expert, un enseignant ou un formateur qualifié). Brousseau a formalisé le processus d'acquisition du concept objet, lors de cette deuxième phase d'apprentissage en des étapes successives bien

réglées : une validation et une formulation du résultat suivies après d'une institution du savoir.

La deuxième condition est celle que suggèrent Lemeignan et Weil-Barais. La conceptualisation en physique, notamment en thermodynamique, du deuxième niveau, celle qui permet d'accéder au concept scientifique, n'est pas systématique pour tous les concepts. On peut construire, avec l'aide d'un enseignant avisé, les concepts catégoriels en généralisant à partir de la réussite et en procédant par induction. Par contre pour les concepts dits « formels », ce sont des inventions du savant, élaborées en procédant par déduction, le long d'une mûre réflexion et qui ont été admises par la communauté scientifique. L'élève ne peut pas les réinventer. C'est le cas du concept de système, d'état, d'énergie, notamment d'énergie thermique dans sa dimension microscopique. Il faut que l'enseignant les lui apporte. Dans ce cas, le concept outil construit lors de la réussite dans la confrontation à une situation problème complexe sert d'appui pour acquérir le concept qu'apporte l'enseignant.

La troisième condition est : la construction d'un concept outil ne peut se faire sans ressources cognitives préalables. Parmi ces ressources, un modèle analogique d'une situation connue s'avère très utile et très efficace dans l'apprentissage d'une situation nouvelle complexe, même s'il n'est pas adapté au départ à celle-ci. Ce modèle guide l'apprentissage qui se réalise par la transformation du modèle initial. Sans modèle analogique d'une situation connue, la conception d'un système technique est difficile voire impossible à réaliser.

La quatrième condition est : la construction d'un concept outil suppose des conceptions. Certaines disparaissent à la fin de l'apprentissage, dans ce cas elles ne constituent pas des obstacles épistémologiques. Certaines persistent, et dans ce cas elles constituent de véritables obstacles épistémologiques. L'apprenant ne pourra pas les dépasser seul, lors de l'apprentissage.

L'apprentissage par le texte est un apprentissage des concepts. Le texte n'apporte que des concepts. Pour paraphraser Vygotski, lorsqu'on croit que le texte transmet les concepts, il ne transmet qu'une représentation des concepts. Le concept est acquis dans sa fonction objet. Il faut agir par soi-même en le mobilisant dans une situation pour le construire. C'est-à-dire qu'il faut le transformer en un concept outil, donc en un concept avec lequel on opère sur cette situation. Le concept est opératoire où n'est pas (Vergnaud, 1990b).

Le passage d'un concept objet à un concept outil ne va pas de soi. Tant que le concept n'a pas subi l'épreuve du réel, il demeure à l'état de représentation abstraite sans contenu. C'est la situation qui lui donne un sens et un contenu. Pour que l'apprenant le transforme en ressource, il faut qu'il soit capable de le mobiliser dans une situation-problème.

Cette transformation doit être guidée, comme on l'a vu, dans le cas du recours à l'analogie proportionnelle pour la vaporisation ou dans le cas du recours à une connaissance d'une situation connue simple, pour l'adsorption. Dans le cas de l'adsorption, l'apport du texte (les forces de van der Waals), le recours à une connaissance (l'adsorption de l'humidité dans les locaux est transformée en adsorption dans la canette) et la mise en jeu de ces deux ressources (internes et externes) dans une situation problème, conduit à l'acquisition du concept dans ces deux fonctions outil et objet.

Cette dernière observation à propos de l'adsorption suggère de ne pas opposer l'apprentissage par le texte et l'apprentissage par les situations. Ce sont deux apprentissages complémentaires. Toute la question est de savoir doser l'apport de l'un et de l'autre. Il semblerait que la réussite à l'école de l'eXia s'explique par ce double apport et une médiation qui respecte l'action en autonomie dans l'espace a-didactique. Nous ajouterons un bémol à la généralisation de la réussite de la combinaison des deux apprentissages à l'eXia. C'est une réussite dans un champ conceptuel particulier : l'informatique, et dans un champs professionnel particulier : le métier d'informaticien.

L'objet technique « canette auto-rafraîchissante », constitue une bonne situation-problème pour apprendre la conception d'objets techniques et pour apprendre des concepts en thermodynamique. Ce qui signifie que l'on peut très bien combiner des dispositifs d'apprentissage par le texte et par les situations, à la fois, pour l'apprentissage d'un métier ou d'une activité et d'un savoir, à condition d'éliminer l'obstacle didactique constitué par la position inversée de la canette qui complique inutilement l'apprentissage.

Bibliographie :

- AGABRA J. (1985), Echanges thermiques, ASTER n°1-2, pp. 95-113
- ASTOLFI J-P. (1997), L'erreur, un outil pour enseigner. Paris, ESF.
- BACHELARD G. (1993), La formation de l'esprit scientifique, Paris, Puf, p. 13
- BACHELARD G. (1998), Le rationalisme appliqué, Puf.
- BACHELARD G. (2005), La philosophie du non, Paris, Puf.
- BALACHEFF N. (1995), Conception, propriété du système sujet/milieu, in Noirfalise R. et Perrin-Glorian M-J. (eds.), Actes de la VII^è Ecole de didactique des Mathématiques. Clermont-Ferrand. IREM de Clermont-Ferrand, pp. 215-229.
- BARTH B-M. (2001), L'apprentissage de l'abstraction, Paris, RETZ.
- BARTH B-M. (2004), Le savoir en construction, Paris, RETZ.
- BAZILE J. et MAYEN P. (2002), Le développement des concepts scientifiques à partir des conceptualisations dans l'action : proposition de didactique professionnelle, ASTER n° 34, Paris, INRP.
- BEGUIN P. et DARSESES F. (1998), Les concepteurs au travail et la conception des systèmes de travail : Points de vue et débats, Acte du colloque « Recherche et ergonomie », Toulouse Le Mirail.
- BEN-DOV Y., (1995), Invitation à la physique, Seuil
- BERTRAND L. et WEIL-FASSINA A. (1995), Formes des représentations fonctionnelles et contrôle des actions dans le diagnostic de panne, In Weil-Fassina, Rabardel P. Et Dubois D., Représentations pour l'action, Toulouse, Octarès, pp. 247-269
- BLANDIN B. (2002), La construction du social par les objets, Paris, Puf.
- BLANDIN B. (2008), Les environnements d'apprentissage, L'Harmattan.
- BLANDIN B. et al (2007), Socialisation et développement des compétences de l'élève ingénieur, Communication publiée dans « Colloque "Compétences et socialisation" », Montpellier.
- BOUTINET J-P. (2001), Anthropologie du projet, Puf, p. 293.
- BROUSSEAU G. (1998), Théorie des situations didactiques, Paris, La pensée sauvage.
- BROUSSEAU, G. (1989), Les obstacles épistémologiques et la didactique des mathématiques, in Bednaz N. et Garnier C. (dir.), Construction des savoirs, obstacles et conflits, Cirade, p. 43-63.
- CAMUSSO D. (2002), Activités et expérience, Mémoire DEA, Paris, CNAM.
- CARTONNET Y. (2000), L'actualisation de la technologie structurale pour la formation de la technicité d'un concepteur de produits industriels, Mémoire HDR (2), Ecole Normale Supérieure de Cachan.
- CASPAR P. (2011), La formation des adultes : hier, aujourd'hui, demain, Paris, Eyrolles.
- CASSIRER E. (1977), Substances et fonctions, éléments pour une théorie du concept, Paris, Minuit.
- CLOSSET J-L (1983), Le raisonnement en électrocinétique, Thèse de doctorat, Université Paris VII.

- CREPAULT J. (1989), Temps et raisonnement : développement cognitif de l'enfant à l'adulte. Lille. Presses Universitaires de Lille.
- CREPAULT J. (1990), Les conceptions de l'environnement physique, in Richard et al., *Traité de psychologie cognitive*, t2, Dunod, p. 53-54
- DARSES F., DETIENNE F. et VISSER W., (2004), Les activités de conception et leur assistance, in Falzon P., *Ergonomie*, Paris, Puf, p. 545-563.
- DENIS C., (2011), La fabrication des cadres : identités et rapports aux savoirs, Thèse, Université Paris Ouest.
- DEWEY J. (1990), *Démocratie et éducation*, Paris, Arman Colin
- DOUADY R. (1982), Jeux de cadre et dialectique outil-objet dans l'enseignement des mathématiques : une réalisation dans tout le cursus primaire. Thèse. Université Paris VII.
- DOUADY R. (1986), Jeux de cadre et dialectique outil-objet, *Recherches en didactique des mathématiques*, n°7.2 pp. 5-31
- FABRE, M. : (1999), *Situations-problèmes et savoir scolaire*, Paris, Puf.
- FILONOV G.N. (2000), Anton Séminovitch Makarenko (1888-1939), Paris, UNESCO, Bureau International d'éducation, vol. XXIV, n°1-2, pp. 83-96.
- FREINET C. (1969/1974), *Pour l'école du peuple*, Alençon, Maspéro.
- GALANT B. et FRENEY M. (2005), *L'approche par problèmes et par projets dans l'enseignement supérieur*, Louvain, UCL.
- GERONIMI A. (2009), Familiarisation à la CAO et activité de conception, Thèse, Université Pierre-Mendès-France Grenoble II.
- GERONIMI A., De VRIES E., PRUDHOMME G. et BAILLE J., (2005). Objets intermédiaires dans une situation de conception en technologie avec CAO au collège. *ASTER* 41, 115-137.
- HARDY M. et MAROY C., 1995, La formation professionnelle et technique en transformation (numéro thématique). *Revue des sciences de l'éducation*, XX(3).
- JOHNSON-LAIRD Ph. (1994), *L'ordinateur et l'esprit*, Paris, O. Jacob.
- LANDRY C. (sous la direction), (2002), *La formation par alternance : état des pratiques et des recherches*, PUQ.
- LEMEIGNAN G. et WEIL-BARAIS A. (1993), *Construire des concepts en physique*, Paris, Hachette.
- LENE A. (2002), *Formation, compétences et adaptabilité : L'alternance en débat*, Paris, L'Harmattan.
- LEPLAT J. (1985) Les représentations fonctionnelles dans le travail, In *Revue Psychologie Française*, n°30, pp. 253-268
- LEPLAT J., (1985). «Les représentations fonctionnelles dans le travail». *Psychologie française*. 30, 3-4, pp. 269-276.
- LEPLAT J., (1995-2), « A propos des compétences incorporées », *Éducation permanente*, N°123, pp. 101-114
- LICK R., (1996), *Histoire du CESI, mémoire de la formation*, les éditions du CESI. Cet auteur retrace l'évolution de la pédagogie du CESI depuis les origines jusqu'en 1996.
- MARTINAND J-L. (1992), *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*, Paris, INRP.

- MARTINAND J-L. 1982, Contribution à la caractérisation des objectifs de l'initiation aux sciences et techniques. Thèse d'état, Paris XI Orsay.
- MARTINAND J-L. 1986, Connaître et transformer la matière, P. Lang. Berne.
- MARTINAND J-L. Didacticiens et didactiques des sciences et techniques de la matière, quelques observations, pp.17-22, 1998, Aster n° 27
- MAUFFETTE Y. (2010), fiche de présentation de la pédagogie de l'école eXia.Cesi
- MAZALON E. (1994), La problématique du partenariat dans la formation en alternance, In C. Landry et F. Serre (dir), Ecole et entreprise. Vers quel partenariat ? (p. 125-140).Sainte-Foy :Presses de l'Université du Québec.
- MENIGAUX J. (1991), "Raisonnements des lycéens et des étudiants en mécanique du solide", Bulletin de l'Union des Physiciens n° 738, pp 1419-1429
- MISSONNIER M-F (2002), Mise en évidence de chemins d'apprentissage des élèves lors d'une ingénierie didactique d'électrocinétique. Thèse de doctorat, Université Paris VII.
- MISSONNIER M-F et CLOSSET J-L (2004), Observation de chemins suivis par les élèves dans l'apprentissage de l'électrocinétique, Didaskalia, n° 25.
- OCHANINE D. (1978), Le rôle des images opératives dans la régulation des activités de travail, in Psychologie et Education, Revue de recherches du laboratoire associé au CNRS, n° 259, Université de Toulouse Le Mirail, mai 1978, n° 2, 63-79
- PALLADO G. (2007), La pédagogie du projet dans les dispositifs de formation d'ingénieurs généralistes CESI, Mémoire de Master 2, Sciences de l'éducation, Nanterre : Université Paris-X.
- PASTRE P. (1988), Essai pour introduire le concept de didactique professionnelle : rôle de la conceptualisation dans la conduite des machines automatisées, Thèse, Université Paris V, Sorbonne.
- PASTRE P. (1994), Variations sur le développement des adultes et leurs représentations, Education permanente, n° 119, 2.
- PASTRE P. (1999a) La conceptualisation dans l'action : bilan et nouvelles perspectives, in Apprendre des situations, Education Permanente, n°139/1999-2, pp.13-35.
- PASTRE P. (1999b), Travail et compétences : un point de vue de didacticien, in Formation emploi n° 67, pp. 109-125 Activités de travail, N° Spécial.
- PASTRE P. (2006), Apprendre à faire, in Bourgeois E. et Chapelle G. (dir.), Apprendre et faire apprendre, Paris, Puf, pp. 109-121
- PASTRE P. (2011), La didactique professionnelle : Approche anthropologique du développement chez les adultes, Puf.
- PASTRE P. et RABARDEL (2005), Modèles du sujet pour la conception, Toulouse, Octarès.
- PETERFALVIE B. (1997), Les obstacles et leur prise en compte didactique, Aster n° 24.
- PIAGET J. (1967), Biologie et connaissance, Paris, Gallimard.
- PIAGET J. (1974a), La prise de conscience, Paris Puf.
- PIAGET J. (1974b), Réussir et comprendre, Paris Puf.
- PIAGET J. (1975), L'équilibration des structures cognitives, Paris Puf.
- PIAGET J. (2005), La représentation du monde chez l'enfant, Puf.

- PLATON (2008), Œuvres complètes, tome III, 2^{ème} partie, Le Ménon, pp. 1051-1089, Paris, Flammarion.
- RABARDEL P. (1993), Microgenèse et fonctionnalité des représentations dans une activité avec instrument, In Weil-Fassina A., Rabardel P. Et Dubois D., Représentations pour l'action, Toulouse, Octarès, pp. 113-137
- RABARDEL P. (1995). *Les hommes et les technologies, approche cognitive des instruments contemporains*. Paris, Armand Colin. (En ligne : <http://ergoserv.psy.univ-paris8.fr/>.)
- RICHARD J-F (1987), *Intellectica*, 1, pp. 65-80
- RICHARD J-F (1998), *Les activités intellectuelles*, Paris, Armand Colin.
- RICHARD J-F et al (1990), *Traité de psychologie cognitive*, t2, Paris, Dunod.
- RICOEUR P. (1983), *Temps et récit*, T. 2 : I. L'intrigue et le récit historique, Seuil.
- RICOEUR P. (1990), *Soi-même comme un autre*, Seuil.
- ROZIER S. (1989), *le raisonnement linéaire causal en thermodynamique élémentaire*, Thèse Univ Paris 7
- RUMELHARD G. (1997), *Travailler les obstacles pour assimiler les connaissances scientifiques*, Aster n° 24
- SAMURÇAY R. et RABARDEL P. (2004), *Modèles pour l'analyse de l'activité et des compétences, propositions*. In SAMURÇAY R. et PASTRE P. (dir.), *Recherches en didactiques professionnelle*, Ocatrès, pp. 163-180.
- SCHMIDT H.G. (1993), *Foundation of problem-based Learning : some explanatory notes Medical Education*, 27, 422-432.
- SIMONDON G. (1989), *Du mode d'existence des objets techniques*, Paris, Aubier.
- TIBERGHIE A. (1989), *Phénomènes et situations matérielles : quelles interprétations pour l'élève et pour le physicien ?*, in, Bednaz N. et Garnier C. (dir.), *Construction des savoirs*, Ottawa, Québec, p. 93-102
- TIBERGHIE A. (2008), *Des connaissances naïves au savoir scientifique*, Paris, Armand Colin.
- VERGNAUD G. (1999), *Le développement cognitif de l'adulte*, in Carré P. et Caspar P., *Traité des sciences et techniques de la formation*, Paris, Dunod, p. 195
- VERGNAUD G., (1986), *Les fonctions de l'action et de la symbolisation dans la formation des connaissances chez l'enfant*, in BRONCKART J.P., MOUNOUD P., PIAGET J., *Psychologie*, Encyclopédie La Pléiade, pp. 821-846.
- VERGNAUD G., (1990a), *Difficultés conceptuelles, erreurs didactiques et vrais obstacles épistémologiques dans l'apprentissage des mathématiques*, Bednaz N. et Garnier C. (dir.), *Construction des savoirs, obstacles et conflits*, Cirade, p. 33-40.
- VERGNAUD G., (1990b), *La théorie des champs conceptuels*, *Recherches en Didactique des Mathématiques*, Vol. 10, n 12.3, pp. 133-170,
- VERMERSCH P. (1976), *Une approche de la régulation de l'action chez l'adulte*, Thèse, Paris, Ecole pratique des hautes études.
- VEXLIARD A. (1951), *L'éducation morale dans la pédagogie de Makarenko*. Persee, in : *Enfance*. Tome 4 n°3, pp. 251-288. Document en ligne : www.persee.fr.

VIENNOT L. (1989), Tendance à la réduction fonctionnelle : obstacle au savoir scientifique et objet de consensus, in Bednaz N. et Garnier C. (dir.), Construction des savoirs, Ottawa, Québec, p. 84-92

VIENNOT L. (1992), Raisonnement à plusieurs variables : tendances de la pensée commune. ASTER n°14, Paris. INRP.

VYGOTSKI L. (1997), Pensée et langage, Paris, La Dispute, p. 371-372

Dossier de renouvellement d'habilitation des formations d'ingénieurs de l'école d'ingénieurs du cesi (2005), p. 19, annexe D1, formation généraliste.

INSEE, chiffre de 2006