



HAL
open science

REPÉRAGE D'INVARIANTS ET CONSTRUCTION DES CONCEPTS SCIENTIFIQUES – LE CAS DU CONCEPT D'ÉLÉMENT CHIMIQUE EN SCIENCES PHYSIQUES

Pierre Fleury

► **To cite this version:**

Pierre Fleury. REPÉRAGE D'INVARIANTS ET CONSTRUCTION DES CONCEPTS SCIENTIFIQUES – LE CAS DU CONCEPT D'ÉLÉMENT CHIMIQUE EN SCIENCES PHYSIQUES. Education. Université Victor Segalen - Bordeaux II, 2012. Français. NNT: . tel-00769801

HAL Id: tel-00769801

<https://theses.hal.science/tel-00769801>

Submitted on 3 Jan 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.

Université Victor Segalen Bordeaux 2

Année 2012

Thèse n°1960

THÈSE

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 2

Mention : Sociétés, Politique, Santé publique

Option : Sciences de l'Education

Présentée et soutenue publiquement

Par Pierre FLEURY

Le 26 novembre 2012

REPÉRAGE D'INVARIANTS ET CONSTRUCTION DES CONCEPTS SCIENTIFIQUES — LE CAS DU CONCEPT D'ÉLÉMENT CHIMIQUE EN SCIENCES PHYSIQUES

Membres du jury

Gérard VERGNAUD , Directeur de recherche CNRS	<i>Président - Rapporteur</i>
Gérard SENSEVY , Professeur à l'université de Bretagne Occidentale	<i>Rapporteur</i>
Hélène SAUZEON , Maître de conférences (HDR) à l'université Victor Segalen - BxII	Examineur
Patricia SCHNEEBERGER , Professeur à l'université Montesquieu - Bx IV	Examineur
Johann-Günther EGGINGER , Maître de conférences à l'université d'Artois	Examineur
Jean-Claude SALLABERRY , Professeur à l'université Montesquieu - Bx IV	Directeur de Thèse

Présentation du contenu du CD-ROM (destiné aux membres du jury)

Concept de l'élément chimique

Un dossier élève est constitué de 5 documents – les titres proposés sont, regroupés sur les trois premières pages pour « 24 rural » et « 24 urbain », sur chaque dossier en dernière page pour « 972 ».

Dossier « 24 rural »

Représentations construites par les élèves du groupe « Arnaut Daniell » (Ribérac 24)

- Corpus Ribérac
- Bilan des R1
- Bilan des indices R2
- Bilan des R1-R2
- Bilan Général avec les liaisons [I_x-C_y]

Dossier « 24 urbain »

Représentations construites par les élèves du groupe de « Bertran de Born » (Périgueux 24)

- Corpus Bertran de Born
- Bilan des R1
- Bilan des indices R2
- Bilan des R1-R2
- Bilan Général avec les liaisons [I_x-C_y]

Dossier « 972 »

Représentations construites par les élèves du groupe « Bellevue » (Fort de France 972)

- Corpus Bellevue
- Bilan des R1
- Bilan des indices R2
- Bilan des R1-R2
- Bilan Général avec les liaisons [I_x-C_y]

Autres concepts

Dossier « Ombre portée »

Un dossier élève, de MS est constitué de trois pages jusqu'à Anthony (p1 à 38 incluse), de GS est constitué de sept pages (p39 à 111).

Représentations construites par les élèves du groupe « Clos Chassaing » (Périgueux 24)

Dossier « Pression »

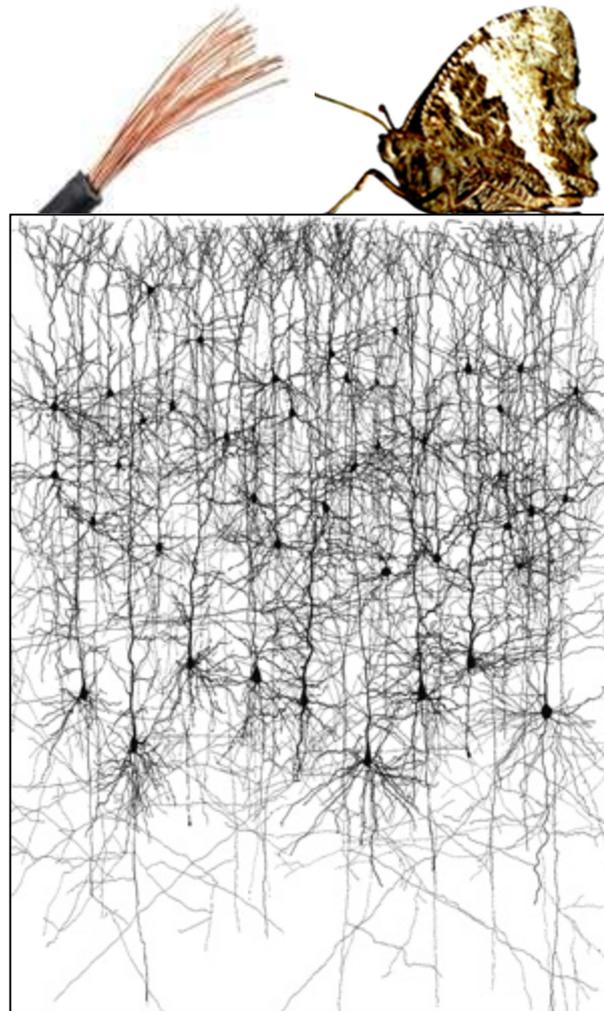
Un dossier élève est constitué de deux pages.

Représentations construites par les élèves du groupe de « Bertran de Born » (Périgueux 24)

Dossier « Thermorégulation »

Un dossier enseignant stagiaire est constitué de six pages

Représentations construites par les enseignants-stagiaires de sciences physiques dans l'académie de Bordeaux (cohorte 2009-2010).



Montage photo ci-dessus : Un réseau de neurones¹ duquel, *émergent*, les deux acteurs principaux de cette thèse : l'élément cuivre (petit faisceau de fil qui se « libère » de sa gaine²) à partir duquel *le concept d'élément* a été abordé – le « silène » (nom latin de ce papillon) dont l'attitude comportementale si particulière en situation de thermorégulation (ailes fermées, les antérieures repliées dans les postérieures) illustre l'intérêt que nous portons aux *invariants*.

¹ http://www.futura-sciences.com/fr/doc/t/robotique-1/d/robots-et-avatars_936/c3/221/p3 (consulté le 7-8-2012)

² <http://fr.123rf.com/images-libres-de-droits/cuivre.htm> (consulté le 7-8-2012)



Anastomose (vue du ciel)
Waimakariri River, Canterbury, New Zealand (2007)

*[J'ai vu, des arcs en lune diurnes : des gloires³,
des monarchies⁴ grandes et petites réécrire leur histoire,
déracinées, mais s'adapter à leurs nouveaux territoires.
J'ai vu, « liberté », avec et sans « s » s'exprimer
des esprits changer d'état, des erreurs sublimées,
des investigations, non, des anastomoses⁵ dans un miroir.
J'ai vu, l'énaction, dans des actions venues de nulle part,
et des invariants dans les effets de cils de *Lycaena dispar*⁶]*

*(P.FLEURY) **Hymne à la distribution**
4-3-2012-14h15- (5°S - 47°E) - siège 61F*

³ Anneaux colorés qui entourent les ombres projetées sur les nuages ; ces phénomènes longtemps considérés comme étant dus aux phénomènes d'optique géométrique trouvent leur explication existentielle dans la physique quantique et son « effet tunnel ». **Quand la lumière est là où l'on ne l'y attend pas.**

⁴ Les monarches sont des papillons qui migrent du Canada au Mexique ; certains individus en 1999 ont été détournés sur l'île de La Réunion où j'ai pu les observer s'adapter à leur nouveau cadre de vie.

⁵ En hydrologie, un fleuve, ou un simple cours d'eau peut au grès des aléas changer de parcours formant ainsi des bras aléatoires en forme de tresse (une anastomose signifie en grec « ouverture »).

⁶ *Lycaena dispar* est le nom latin d'un petit rhopalocère protégé nommé « Le cuivré des marais ».

REMERCIEMENTS

Ce travail est avant tout une mise, une remise en question(s). Mais il est aussi, le fruit d'une amitié sans laquelle rien n'aurait été possible, et l'aboutissement concret, d'une rencontre. En cela, il est marqué du sceau de la loyauté et du respect. C'est l'unique fierté que je revendique. Pouvoir observer sa propre représentation sans détourner le regard.

Jean-Claude, tu es parvenu à force de patience à faire émerger chez moi, si ce n'est le goût, pour le moins les petits plaisirs ponctuels, de ne pas voir le ciel, ciel ! Tu m'as fait plonger dans des lectures « improbables » bien loin de mes sentiers de V.T.T ou des migrations bleues d'octobre, me donnant la possibilité de rester « vivant », et de me sentir mieux considéré.

Je salue le chercheur, toujours en éveil, mais aussi l'homme qui sans jamais prononcer un mot plus haut que l'autre, parvient à faire passer les messages essentiels.

J'espère avoir été digne de ta confiance. Je veux aussi associer Dany à ce travail qui a fait de mes venues chez vous des moments si agréables.

Je remercie les deux rapporteurs de cette thèse, M. Vergnaud et M. Sensevy, pour l'intérêt qu'ils ont porté à l'ensemble de ce travail. Mes remerciements sont dirigés vers les autres membres du jury, Mme Sauzéon, Mme Schneeberger et M. Egginger, lesquels ont accepté de porter un jugement sur ces travaux.

Je veux dire ma reconnaissance à ma femme et ma fille, qui m'ont vu si souvent devant cet écran qui me fait face, me permettant d'écrire ces lignes et qui ont subi ce choix tellement égoïste consistant à vivre de manière électronique plus que de raison durant ces dernières années.

À toutes les deux, je veux dire, ici, que ce sont elles, qui par leur tolérance, leur complaisance, ont fait de moi quelqu'un d'autre, régénéré, aux sens propre et figuré, un *autre moi* en quelque sorte. Je promets de me rattraper, à défaut de pouvoir le rattraper.

Qu'il me soit permis d'associer à ce travail ces insectes, ceux qui butinent grâce à leur trompe, et qui m'ont donné la chance de prendre conscience du réel « pouvoir » des *invariants*⁷. Depuis l'été 1976, où j'ai commencé à leur courir après, je ne pensais pas qu'ils m'auraient tant apporté. Mon père a construit son manche, son arceau, ma mère cousu sa poche (mon premier troubleau). Grâce à eux deux, cet objet est encore présent aujourd'hui ! Je tiens plus que jamais à leur dire, ici, ma reconnaissance pour cette initiative, et pour tout le reste aussi. Merci à ma mère pour s'être plongée dans cette relecture fastidieuse.

Je remercie pour leur disponibilité mes deux collègues professeurs de sciences physiques, M. Carbonel et M. Tinas grâce à qui leurs élèves ont subi les « petits caprices » de ce protocole expérimental sur le concept de *l'élément chimique*.

Je remercie tout particulièrement mon collègue M. Grasset avec lequel je partage des moments sportifs depuis si longtemps, et qui m'aura permis de récupérer deux corpus sur les concepts de *l'élément chimique* et de *pression*.

Je tiens à remercier très chaleureusement mes collègues du premier degré, Mme Dagos, Mme Fraszczynski, ainsi que la directrice de l'école maternelle de *Clos Chassaing* Mme Morigny.

⁷ Le papillon (Le silène) qui s'affiche sur le montage photo de la première de couverture, utilise une technique de thermorégulation spécifique, qui est un invariant comportemental dont j'ai pris conscience il n'y a que quelques années (Fleury et Grasset (2009)).

Elles m'ont accueilli dans leur école et leur classe, où j'ai pu me confronter à la réalité du terrain et récupérer le corpus sur le concept d'*ombre portée*.

Merci à Patrick BAST, qui par ses conseils éclairés, aura permis à ce document de revêtir cette forme. Rien ne semble devoir lui résister !

Enfin, je veux remercier tous les élèves, « qui ont joué le jeu », et se sont prêtés à cette aventure malgré eux – j'espère qu'ils n'en garderont pas un trop mauvais souvenir !! Merci enfin à tous ces enseignants-stagiaires de sciences physiques, devenus « collègues » entre temps, qui ont dû « plancher » sur ce scénario *déroutant*. J'espère qu'ils ne verront plus « le vivant » avec le même prisme, car ils auront été confrontés malgré eux, au concept de *thermorégulation*.

Je veux dédier ce travail à toutes celles et à tous ceux qui sont parfois tentés de croire qu'*Ad impossibilia nemo tenetur*⁸, mais qui, par orgueil, par passion, par fierté, se battent tous les jours, parce qu'ils refusent de vivre une histoire prédigérée ou écrite à l'avance. Pour toutes celles et tous ceux qui pensent que malgré tout ce qui nous est promis, cela vaut (quand même) la peine d'essayer, de refuser l'innéisme, la *suffisante*, celle du plus fort, et de donner, se donner, avec un petit espoir de retour, avec l'espoir d'un *effet papillon*.

⁸ « À l'impossible nul n'est tenu »

SOMMAIRE

Remerciements.....	p5
Introduction générale.....	p8
PREMIÈRE PARTIE : l'investigation, les apprentissages, les représentations, les concepts, le positionnement épistémologique.....	p14
Chapitre I L'investigation aujourd'hui.....	p15
I- De la belle dame, à Sarith, en passant par Maïna.....	p16
II- Tenants et aboutissants d'une méthodologie pédagogique.....	p21
Chapitre II Les théories de l'apprentissage.....	p30
I- Les six paradigmes.....	p31
II- La question des apports récents.....	p41
III- Enseigner : faire un choix de paradigme.....	p43
Chapitre III Points de vue sur les « représentations ».....	p45
I- La question du concept de <i>représentation</i>	p46
II- La question de la catégorisation des représentations.....	p62
Chapitre IV Points de vue sur les « concepts ».....	p68
I- Premières approches.....	p69
II- L'apport de Vergnaud.....	p72
III- Concept et définition du concept.....	p76
IV- Discussion.....	p80
Chapitre V Questions d'ordre épistémologique.....	p87
I- Le recadrage de Le Moigne.....	p88
II- Méthode et réflexion sur la méthode.....	p94
III- La position du chercheur.....	p101
SECONDE PARTIE : Le concept de l'élément chimique, invariant(s) et didactique, autres concepts et perspectives.....	p106
Chapitre VI L'élément chimique : première lecture.....	p107
I- Éléments de contexte et outils de récupération des données.....	p108
II- La première lecture.....	p117
Chapitre VII L'élément chimique : seconde lecture.....	p144
I- Intérêts et limites des résultats de la première lecture.....	p145
II- Nouveaux contextes environnementaux.....	p145
III- Les nouveaux outils d'analyse.....	p148
IV- Nouveaux résultats de la seconde lecture.....	p151
Chapitre VIII Premier bilan.....	p160
I- Analyse des représentations des élèves au cours du scénario.....	p161
II- Catégorisation concept/invariant.....	p172
III- Vers une recherche pluridisciplinaire liée aux invariants.....	p178
Chapitre IX Ébauches exploratoires sur d'autres concepts.....	p180
I- Le concept d' <i>ombre</i>	p181
II- Le concept de <i>pression</i>	p184
III- Le concept de <i>thermorégulation</i>	p191
Conclusion générale.....	p203
Perspectives.....	p206
Activités de recherche.....	p210
Bibliographie.....	p211
Index des auteurs.....	p217
Index des matières.....	p219
Table des matières.....	p220

INTRODUCTION GENERALE

Comme toute recherche, celle-ci n'échappe pas à son *histoire*. Elle débute en 2002 avec une première tentative de récupérations de matériaux, dans une de mes classes de seconde générale au lycée Arnaut Daniel⁹, à l'initiative de mon collègue¹⁰ devenu directeur de thèse aujourd'hui. Nous planchions déjà « à cette époque » sur le concept d'élément chimique et tentions de comprendre comment mettre les élèves en situation de mieux l'appréhender.

À cette occasion, il m'a fallu alors venir au lycée à de très nombreuses reprises, préparer une expérience de manière minutieuse¹¹, dont le personnage principal était le « cuivre ».

Les difficultés majeures résidaient dans l'identification, entre autres, des bonnes quantités de métal cuivre, de la bonne concentration d'acide nitrique, de la bonne proportion de carbone végétal à utiliser et à distribuer aux élèves. J'ai dû également m'interroger sur les supports qu'il était intéressant de donner aux élèves, aux espaces de chaque feuille qu'ils auraient à remplir. Je crois que ce fut la première fois que je construisais un outil qui leur était autant destiné qu'à moi-même. L'idée étant bien de pouvoir récupérer « ce qui avait pu se passer ». Peut-être que cette expérience a été, en définitive, mon baptême du feu, en tant qu'« apprenti-chercheur ». Elle m'a permis d'être confronté à cette occasion, sans y prêter véritablement attention, au « monde des invariants ».

Ces invariants auxquels Sallaberry (2004) croit si fort, et qui ont été « vus » par Vergnaud (1985) comme des objets incontournables dans l'apprentissage d'un concept, mais qui, alors, ne m'avaient pas encore¹² convaincu.

Tout au long de ce parcours *initiatique*, nous avons tenté de comprendre quelle place nous pouvions donner aux invariants, en sciences physiques, lors de la construction d'un concept scientifique. Il est toujours tentant de se donner les moyens de montrer ce que l'on souhaite trouver. C'est un piège dans lequel nous espérons ne pas être tombés. Sans parler de *masochisme*, nous avons dès nos premiers résultats, qui auraient pu nous « satisfaire », cherché comment les rendre plus fiables en reconsidérant nos outils d'analyse, quitte à se voir « contredits » par la suite.

Par ailleurs, afin de ne pas être enfermés dans un paramètre de contexte social donné, nous avons fait vivre notre situation sur trois milieux très différents, rural, urbain et outre-mer.

Nous présentons nos travaux avec l'humilité qui s'impose car nous travaillons sur des représentations, celles des élèves¹³. Celles-ci par essence étant des inférences, nos hypothèses doivent être prises pour ce qu'elles sont, *un pion*¹⁴ que nous avançons sur le grand échiquier des interrogations didactiques. Ces interrogations ne sont pas nouvelles : de nombreuses disciplines comme les mathématiques, l'éducation musicale, l'histoire et géographie, se sont interrogées sur la place à donner aux invariants dans la conquête des concepts.

Vergnaud (1985) propose une structure de type (S,I,S) laquelle sous-tend que la construction d'un concept scientifique est accompagnée entre autres de l'émergence d'un système d'invariant(s) lié au concept. Nous proposons ici d'observer si, en sciences physiques, sur l'exemple du concept d'élément chimique – au sein de classes de seconde générale du lycée –

⁹ Un des troubadours les plus influents de la période médiévale né à Ribérac en Dordogne

¹⁰ Mais aussi « papa » d'une de mes élèves.

¹¹ Cette préparation fine conditionnait le déroulement général de l'expérience car celle-ci est une succession de manipulations qui chacune était dépendante de celle qui la précède.

¹² Mon intérêt des invariants était bien présent toutes ces années, mais ce travail de recherche aura eu pour conséquence de le faire émerger, de le structurer, et de lui faire « prendre forme ».

¹³ Mais aussi sur les nôtres, lesquelles interfèrent inévitablement sur les premières. Nous sommes bien conscients d'être un paramètre qui aura perturbé le système.

¹⁴ Même si l'on sait que cette pièce peut dans certaines circonstances s'avérer très utile !!

l'élaboration de l'invariant, dans le cadre d'une telle structure, est, sinon la condition de celle du concept, du moins susceptible de le rendre plus lisible.

Notre recherche s'appuie sur un concept scientifique incontournable de la chimie : le concept de *l'élément chimique*. Notre choix s'est orienté sur lui car il est une des pierres angulaires de l'enseignement secondaire.

Les difficultés observées dans sa maîtrise (Sallaberry, 2000), par de nombreuses cohortes d'enseignants stagiaires en sciences physiques d'une part, les obstacles liés à son enseignement (Laugier et Dumon, 2003) au lycée d'autre part, la recherche de palliatif en jouant sur l'analogie (Khanfour-Armalé et Le Maréchal, 2008), ainsi que les récentes préconisations des nouveaux programmes (BO spécial n°4 du 29 avril 2010) lesquelles ne permettent pas de clarifier le cadre théorique du concept, nous ont amenés à faire ce choix.

Nos travaux s'appuient sur un constat (Martinand et Viovy, 1979 ; Viovy 1984 ; Martinand, 1986), qui demeure « malheureusement » d'actualité : enseigner le concept de l'élément chimique se présente comme un véritable défi.

Nous allons montrer pourquoi s'intéresser à la manière dont les élèves peuvent construire l'invariant lié à ce concept est digne d'intérêt. En effet nous avons pu observer que la construction de ce concept était fortement liée à celle de son invariant, sans toutefois que la réciproque puisse être aussi prégnante.

Nous avons réalisé ces observations dans trois contextes très différents dont deux en métropole et un en outre-mer sur des cohortes d'élèves de seconde générale.

Nous sommes en phase de recherche sur d'autres concepts qui rayonnent sur des sujets de maternelle, de lycée mais aussi d'enseignants stagiaires afin de conforter ces premières tendances. Nous nous inscrivons dans une logique d'articulation entre recherche et formation (Morandi, 1997). Ainsi à travers ces différents travaux est posée la question sous-jacente de l'intérêt et du transfert de nos hypothèses au sein des organismes de formation, avec en toile de fond des applications concrètes, à l'école, au collège et au lycée.

Par ailleurs, au regard du statut singulier des invariants, nous proposons une manière différente d'appréhender les concepts scientifiques qui ont été l'objet de nombreuses tentatives de classifications (Barth, 1987, 1993 ; Lemeignan & Weil-Barais, 1993). Plutôt que de tenter de classer les concepts scientifiques, nous avançons que classer leurs invariants est une manière, au moins aussi intéressante, d'observer les attributs des premiers et de mettre en lumière leur spécificité.

En outre, notre étude étant dépendante des représentations produites par les sujets, nous avons imaginé définir leurs *filiations cognitives* (à partir des catégorisations proposées par Sallaberry, 1996, 2004). Cela nous a permis de poser la question du lien, entre la manière dont un sujet « représente » et son aptitude à construire le concept scientifique étudié ici en chimie.

Dans une première partie :

Nous nous intéressons à la manière dont notre intérêt pour les invariants a pu émerger au fur et à mesure des rencontres qui ont jalonné nos parcours ces dernières années et aux enjeux liés à l'outil pédagogique, que l'on nomme aujourd'hui « démarche par investigation » (Bruner, 1996 ; Antheaume, 2001 ; Windschitl, 2002 ; Courtillot, 2004 ; Charpak et al, 2005 ; Sensevy, 2011 ; Calmettes, 2012), lequel semble vouloir s'imposer à l'ensemble de la communauté éducative en tant que « pédagogie nouvelle » (**Chapitre 1**).

Nous nous attardons sur les spécificités des six différentes théories de l'apprentissage, l'associationnisme (Thorndike, 1898 ; Rey, 1919 ; Skinner, 1969 ; Reuchelin, 1977), la théorie de la forme (Köhler, 1927 ; De Montpelier G. 1973 ; Delay, 1975), la théorie opératoire (Piaget et Inhelder, 1955 ; Piaget, 1966), la théorie de la médiation (Vygotsky,

1933 ; Bronckart, 1985 ; Bruner, 1996), et au positionnement des deux approches des sciences cognitives – le cognitivisme fort (McCulloch & Pitts, 1943 ; Churchland & Sejnowski, 1992 ; Crick, 1994) et le connexionnisme (Hebb, 1949 ; Delay, 1975 ; Edelman, 1989 ; Smolenski, 1992 ; Dupuy, 1994) –. Nous abordons également, les apports récents, en particulier la proposition portée par Varela (1995) sur *l'énaction*, ainsi que la manière d'appréhender l'acte d'enseigner au regard de l'ensemble de toutes ces théories (**Chapitre 2**).

Nous enclenchons une réflexion sur les représentations car celles-ci nous sont indissociables, comme le côté pile d'une pièce à son côté face. Nous faisons un bilan détaillé des différentes approches conceptuelles existantes des représentations (Pierce, 1885 ; Ladrière, 1975 ; Piaget, 1979 ; Le Ny, 1985 ; Eco, 1988 ; Prochiantz 1995 ; Sallaberry, 1996, 2004 ;) avec, entre autres, celles de Lefebvre (1980) et d'Edelman (1992). Nous mettons l'accent sur leur complexité et nous les hissons au rang de concept. Elles sont l'essence même de nos différents corpus et le siège de nos interprétations, ce qui nous oblige à les observer avec minutie. Nous discutons de la relation représentation-didactique (Vergnaud, 1985 ; Joshua et Dupin, 1993 ; Bonan, 2001 ; Sensevy, 2002 ; Giordan & de Vecchi, 2010 ; Orange, 2011) ainsi que de l'apport des sciences cognitives à ce concept (Varela, 1989 ; Dupuy 1994). Nous construisons un lien entre elles et les différentes théories de l'apprentissage pour relater la manière dont chacune les considère. Enfin nous débattons de la question de la catégorisation en nous appuyant sur les principales qui sont aujourd'hui proposées (Bruner *et al* 1966 ; Vergnaud 1985 ; Sallaberry 1996 ; Resta-Schweitzer & Weil-Barais 2007) - (**Chapitre 3**).

Nous nous focalisons sur la manière dont sont appréhendés les concepts (Vygotsky, 1985 ; Barth, 1987 et 1993) et sur ceux que l'on qualifie de « scientifiques » (Ullmo, 1967 et 1969 ; Vergnaud 1985, 1990 ; Lemeignan et Weill-Barais, 1993), lesquels sont dotés d'attributs si spécifiques qu'il est judicieux de les distinguer des autres. Nous nous attardons sur le concept de l'élément chimique (De Crescenzo, 1999 ; Martinand, 1986) qui est la base de notre recherche. Nous examinons dans quelle mesure un concept est adossé à un invariant ou à un système d'invariants en sciences physiques et au-delà de cette discipline. Cela nous amène à faire une proposition de définition d'un concept (Sallaberry, 2004). Nous engageons une discussion autour de l'intérêt que peuvent revêtir les invariants dans la conquête des concepts scientifiques tout en repérant les éventuelles spécificités de leurs invariants (Prochiantz 2008, 2010) (**Chapitre 4**).

Nous décrivons l'environnement épistémologique de notre recherche en partant du constructivisme, hissé au rang d'*épistémologie constructiviste* (Le Moigne, 1995). Nous comparons les épistémologies, *positiviste* et *constructiviste*, dans leurs aspects *gnoséologique* et *méthodologique*. Nous faisons état de notre méthode et des réflexions qu'elle a suscitées au fur et à mesure des avancements de nos travaux. Nous expliquons les raisons qui nous ont amenés à construire de nouveaux outils d'exploitation de nos corpus et comment nous les avons faits évoluer. Nous donnons les positions prises pour prendre en considération la complexité de nos objets (les représentations) et finissons par la manière dont nous considérons notre propre position de chercheur (**Chapitre 5**).

Dans une seconde partie :

Nous nous concentrons sur la description de notre premier contexte de travail et de son environnement afin de situer notre étude. Puis nous décrivons la situation expérimentale, pour « travailler » le concept d'élément chimique, que nous avons utilisée et qui s'inspire des propositions de Viovy (1984). Nous rendons compte des différents supports élaborés avec nos collègues sur lesquels les élèves se sont appuyés pour construire leur représentation.

Ces différents objets permettent de présenter notre corpus, la première lecture que nous en faisons, et les résultats provisoires qui s'en dégagent. Nous faisons par la suite une analyse systématique des représentations pour chaque élève en utilisant la catégorisation proposée par Sallaberry (1996,2004). Cela nous facilite la manière d'aborder la liaison Invariant-concept qu'il nous est envisageable d'observer. Celle-ci est formulée à partir des niveaux de construction, établis spécifiquement pour l'un (notés I_x : où x représente le niveau de construction de l'invariant atteint) et l'autre (notés C_y : où y représente le niveau de construction du concept atteint).

Enfin, nous tentons de croiser les liaisons obtenues par chaque élève et la qualité de leur représentation en établissant ce que nous proposons de nommer *leur filiation cognitive*. **(Chapitre 6)**.

Nous abordons les évolutions, les adaptations qu'il faut mettre en œuvre afin de pouvoir obtenir des informations plus fiables sur la nature du lien entre le concept d'élément chimique et son invariant. Nous présentons les deux nouveaux contextes où nous avons souhaité remettre en questions les premiers bilans du chapitre précédent. Nous faisons état des nouveaux outils conçus s'agissant des niveaux de constructions de l'invariant et du concept. Les résultats que nous obtenons nous confortent dans l'idée qu'il existerait bel et bien un lien entre les deux constructions et nous invitent à formuler deux hypothèses. Une *hypothèse forte* et une *hypothèse faible* qui peuvent être rapidement résumées par les deux expressions suivantes : - « *tenir le concept impose de tenir l'invariant* » - « *tenir l'invariant facilite l'accès au concept* » **(Chapitre 7)**.

Nous enclenchons l'analyse des représentations des élèves au cours du scénario afin de réaliser un bilan des *filiations cognitives* à l'issue de notre seconde lecture des résultats (celle du chapitre 7). À partir des résultats des trois groupes, nous montrons comment au-delà de l'invariant, mettre les élèves en situation de représenter facilite les cheminements cognitifs dans la conquête du concept. Nous mettons l'accent, en particulier, sur le rôle dominant des représentations rationnelles dans un tel processus. Nous abordons les enjeux didactiques liés à l'apprentissage du concept d'élément chimique à partir d'une analyse des scénarios proposés aujourd'hui. Cela nous conduit à formuler quelques suggestions susceptibles de faciliter cet apprentissage délicat à la lumière des éléments dont nous disposons désormais. Enfin, nous poussons plus avant notre réflexion sur la construction des concepts scientifiques. C'est ainsi que nous proposons de catégoriser les invariants ; une ébauche d'organisation est avancée laquelle est, à ce stade, construite autour de quatre catégories : les invariants *par collection*, *par conservation-transformation*, *par équilibre* et *par adaptation*. Enfin, nous nous interrogeons sur une approche pluridisciplinaire du rôle que peuvent jouer les invariants. Nous formulons l'hypothèse que recherche et formation à son sujet pourraient trouver des terrains d'investigation dignes d'intérêt **(Chapitre 8)**.

Nous rendons compte de l'état d'avancement d'un travail exploratoire organisé autour de trois exemples de recherche en cours, sur des concepts scientifiques : le concept d'*ombre* (en maternelle), le concept de *pression* (en seconde générale), le concept de *thermorégulation* (en formation des maîtres). Après avoir décrit les différents contextes de travail, les scénarios didactiques imaginés, nous faisons état des premiers résultats obtenus en mettant l'accent sur le rôle des différents invariants choisis au sein des autres catégories proposées au chapitre précédent (le concept d'*ombre* est lié à un système d'invariant *par collection*, le concept de *pression* à un invariant *par équilibre*, et celui de *thermorégulation* est lié à deux invariants à cheval sur deux disciplines : invariant *par conservation-transformation* en sciences physiques et *par adaptation* en sciences de la vie et de la Terre) **(Chapitre 9)**.

PRÉSENTATION
DU TRAVAIL DE RECHERCHE

Notre point de départ :

Nous interrogeons le rôle que peut jouer l'invariant ou le système d'invariant(s), lié(s) à un concept scientifique, lors de la construction de ce dernier.

PARTIE THÉORIQUE	<i>Chapitre 1</i> L'investigation aujourd'hui
	<i>Chapitre 2</i> Les théories de l'apprentissage
	<i>Chapitre 3</i> Points de vue sur les « représentations »
	<i>Chapitre 4</i> Points de vue sur les « concepts »
	<i>Chapitre 5</i> Questions d'ordre épistémologique

PARTIE EMPIRIQUE	<i>Chapitre 6</i> L'élément chimique : première lecture
	<i>Chapitre 7</i> L'élément chimique : seconde lecture
	<i>Chapitre 8</i> Premier bilan
PERSPECTIVES	<i>Chapitre 9</i> Ébauches exploratoires sur d'autres concepts

RÉSUMÉ

Vergnaud (1985) propose une structure de type **(S,I,S)** qui sous-tend que la construction d'un concept scientifique est accompagnée entre autres de l'émergence d'un système d'invariant(s) lié au concept.

Nous proposons ici d'observer si, en sciences physiques, sur l'exemple du concept d'*élément chimique* – au sein de classes de seconde générale du lycée –, l'élaboration de l'invariant, dans le cadre d'une telle structure (S,I,S), est, sinon la condition de celle du concept, susceptible de le rendre plus lisible.

Nos résultats montrent que la construction du concept d'*élément chimique* semble être conditionnée par celle de son invariant. En revanche la réciprocity ne paraît pas aussi évidente.

Nous observons des tendances similaires sur d'autres concepts en sciences physiques, lesquels sont en cours d'exploitation. Cela nous amène à penser que les invariants pourraient se voir doter, en sciences physiques, d'un statut didactique « majeur ».

Nous proposons une ébauche de classification des invariants, en sciences physiques, afin de donner de la lisibilité aux objets complexes que sont les concepts scientifiques auxquels ils sont associés.

Nous imaginons que toutes les disciplines pourraient « penser » leurs invariants et que ces derniers pourraient être valorisés, au sein des organismes de formation, pour ce qu'ils sont susceptibles d'apporter aux élèves dans un cursus d'apprentissage.

PREMIÈRE PARTIE : l'investigation, les apprentissages, les représentations, les concepts, le positionnement épistémologique

Chapitre I L'investigation aujourd'hui

Chapitre II Les théories de l'apprentissage

Chapitre III Points de vue sur les « représentations »

Chapitre IV Points de vue sur les « concepts »

Chapitre V Questions d'ordre épistémologique

Chapitre I L'« investigation » aujourd'hui

Synthèse du chapitre

Il y a dans *toute chose* l'existence d'un invariant. L'apport des sciences cognitives permet de révéler cette « présence » et est en cela un allié important des sciences de l'éducation. Laisser s'exprimer et extérioriser un sujet, c'est lui donner les moyens de construire sa liberté et donc la nôtre. L'« *investigation* » permet de problématiser et de construire en partenariat, des éléments de réponses, en observant, en représentant et en raisonnant. Il y a là des enjeux majeurs, qui feront, pour partie, ce que nous serons demain.

Qu'il me soit autorisé ici de décrire quelques éléments du cheminement qui peut expliquer ce parcours initiatique vers le monde de la recherche, où se côtoient, tour à tour, autonomie, cartographie, concepts, distribution, invariants, investigation, neurones, opérations, et représentations. Bien qu'ayant suivi un cursus universitaire en sciences physiques, les deux sensibilités « vitales » de mon quotidien, la sécrétion d'endorphine¹ d'une part et la science du vivant (la biologie) d'autre part, nous accompagneront souvent au cours de ces quelques pages.

I- De la belle dame, à Sarith, en passant par Maina

Ce sont trois petites histoires auxquelles vous êtes ici conviés. Chacune d'entre elles racontent, voire justifient, l'intérêt de tisser des liens étroits entre sciences cognitives et sciences de l'éducation. La logique de cette démarche s'inscrit dans la volonté d'interroger la manière de rendre plus lisible, donc plus accessible, un savoir. Le formateur interroge les outils qu'il utilise pour mieux les transmettre. Ces aventures d'un physicien-chimiste malgré lui sont le témoignage d'instantanés qui marquent et qui peut-être, ne vous laisseront pas indifférents.

I-1 L'histoire d'un effet papillon

Le papillon est un petit hexapode² dans l'ordre des lépidoptères (*lépis-lépidos* : écailles et *pteron* : aile). Mon intérêt se porte plus particulièrement sur les rhopalocères³, ceux qui se déplacent la journée, s'enivrent du nectar des fleurs et que l'on capture à l'aide d'un troubleau⁴.

Notre société a un rapport particulier avec cet insecte car son côté inoffensif, sa beauté alliée à sa fragilité nous envoient des ondes positives. La mode s'est emparée de son « image », les publicitaires en usent à « tire d'ailes » et il continue de fasciner les entomologistes.

Certains peuvent être migrants, tisser des relations de myrmécophilie⁵ obligatoire, planer en jouant avec les courants d'air à flanc de colline (*Hill topping*), utiliser avec subtilité les clés du mimétisme, copier la génétique de son voisin pour enfiler un habit plus avantageux, faire des allers retours colorés pour déjouer les effets d'une pollution industrielle⁶, tout en répondant à cette triple exigence : *se déplacer, se protéger, se reproduire*.

Là, les soucis commencent, et l'existence du rhopalocère est un pied de nez aux contradictions de son triangle de survie. Se reproduire c'est avant tout se reconnaître donc s'afficher, mais s'afficher c'est accepter le risque d'être repéré. Se protéger c'est se « faire oublier », mais oublier de se déplacer c'est faire l'impasse sur l'obligation de se nourrir et d'assurer sa descendance. Comment trouver l'âme sœur immobile sans être vu en faisant la grève de la faim ? Chaque papillon de jour parvient à trouver un équilibre subtil pour satisfaire à toutes ces contradictions qui se traduisent dans son comportement.

Par rapport à ces impératifs contradictoires, les comportements des papillons sont extrêmement variés. Alors que certains rentrent leurs ailes antérieures dans les postérieures pour mieux se confondre avec l'écorce du chêne, du noyer ou du bouleau, réduisant leur surface apparente d'un quart, *la belle dame*⁷ arbore de manière ostentatoire sa palette colorée.

¹ Morphine endogène, substance naturelle, sécrétée par l'hypothalamus et l'hypophyse pendant et après une activité physique intense.

² Ordre des insectes dont l'attribut morphologique est : *six pattes*

³ Sous-ordres (papillons diurnes)

⁴ Filet constitué d'un manche et d'une poche

⁵ Relation entre une fourmi et un autre organisme vivant, qui conditionne la survie du second.

⁶ Berthier (2003) Evolution génétique du papillon pour s'adapter à son environnement

⁷ Papillon migrant venant du cercle polaire et arrivant sous nos latitudes vers la fin de l'été

Vous pouvez observer souvent cet insecte, agitant ses ailes (comme le fait l'éléphant avec ses oreilles) quand il butine au soleil, alternant les phases d'exposition à notre étoile et celles où il se pose sur des sites plus ombragés, ailes fermées.

On peut par ailleurs aisément se rendre compte que les rhopalocères de couleurs claires volent généralement moins rapidement, mais plus longtemps que les sombres.

Hypothèse a été formulée que les mouvements des ailes de ces hexapodes pourraient être la réponse subtile entre leurs impératifs vitaux et des lois fondamentales de la physique.

Quand on est aussi fragile et inoffensif, que la nature ne vous a pas doté de caractères morphologiques de prédation, il faut trouver les réponses ailleurs tout en trouvant un équilibre subtil indispensable pour assurer sa descendance. Il faut se montrer plus « intelligent », à savoir, utiliser la *distribution*⁸ pour s'adapter aux circonstances.

Ces observations ont conduit à penser que les rhopalocères, par ces attitudes, régulent leur température corporelle. L'accroître le plus rapidement possible dans les phases d'échauffement pour rendre possible l'envol, mais également l'abaisser pour ne pas dépasser un seuil vital, voilà ce qui se joue dans cette palette de comportements qui ne doit rien au hasard. C'est ainsi qu'il a été démontré que les ailes d'un papillon sont des organes thermorégulateurs⁹ (qui régulent sa température corporelle).

Pourquoi cette première histoire apparemment éloignée de notre sujet ? Tout simplement car elle a été le théâtre inattendue d'une émergence¹⁰ cognitive.

Depuis plus de trente ans que mon intérêt se portait sur les observations de ces petits organismes, jamais¹¹, je n'avais fait de rapprochement entre leurs attitudes comportementales et les lois de la physique, en l'occurrence celles de l'optique.

Un jour de l'été 2007, je me souviens de cette émergence alors que j'observais de nouveau cet insecte se jouer du soleil. Comme foudroyé, « j'ai vu » alors, ce qui existait depuis « toujours ». À cet instant, l'aléatoire, le désordre, sont devenus brusquement ordre et discernement. Ce changement de statut qui passe de « l'invisible » à la soudaine évidence, n'est pas sans laisser indifférent le didacticien. Je venais de comprendre que les attitudes comportementales des papillons sous nos latitudes, celles qui consistent à maîtriser l'ouverture et la fermeture de leurs ailes rendaient possible leur thermorégulation. Plus encore, que la réflexion et la diffusion de la lumière devaient être les lois physiques « expliquant » de telles attitudes. Cet événement a bousculé l'adulte et l'enseignant, il l'a invité à vouloir croire en un éventuel mécanisme reproductible qui libère : bref, il a suscité et suscitera encore longtemps intérêt et interrogations.

Pourquoi cette émergence, pourquoi aujourd'hui plutôt qu'hier ? Existe-t-il un mécanisme neurologique qui puisse en rendre compte ? Comment la faciliter, la susciter, est-elle transposable sur un plan didactique ? Voici les premiers questionnements qui sont venus à la suite de cette mésaventure déstabilisante.

Dès lors, j'ai observé de manière différente ces attitudes comportementales en recherchant ce qui pouvait les singulariser. Quelques expériences supplémentaires plus tard, il apparaissait de manière assez évidente qu'un lien étroit existait entre les paramètres orientation du papillon et position du soleil dans le ciel d'une part, couleurs des ailes et ouvertures de celles-ci d'autre part. Je venais de mettre à jour, sans en avoir conscience à l'époque, pour cet insecte, le

⁸ Je fais ici référence à l'approche connexionniste (cf. *Chap II (I-6)*)

⁹ Fleury et Grasset (2008) BUP 902 pp 415-426 et Fleury et Grasset (2009) BUP 914 pp 509-547

¹⁰ Vous aurez noté le volontaire pléonasm

¹¹ Wittgenstein (1956) « ...la confirmation de faits dont on a jamais douté et qui n'échappent à la perception que parce qu'ils sont constamment présents devant nous ».

concept de *thermorégulation* et l'un de ses invariants associés, vraisemblablement celui de l'*adaptation*¹² d'un organisme, comme vous et moi, à caractère distribué.
[Fin de la première histoire].

I-2 L'histoire de la rencontre avec *Sarith*

Mon arrivée à l'I.U.F.M d'Aquitaine en septembre 2003 (après une quinzaine d'années passées en collège¹³, lycée, lycée professionnel dans pas moins de quatorze établissements différents) m'a amené à aller chercher sur le terrain¹⁴ les informations dont j'avais besoin. Devant enseigner à des professeurs des écoles en préparation au concours, ou fonctionnaires stagiaires, mon passe-temps favori s'est focalisé sur l'observation d'une méthodologie nouvellement inscrite dans les programmes¹⁵ : « la démarche d'investigation ».

Étant encore en charge de classes au lycée, j'ai pu apprécier l'intérêt que portaient mes élèves à cet outil pédagogique, qui était déjà utilisé par certains d'entre nous, sans en être « avertis ». La chance a voulu que le département de la Dordogne abrite l'un des centres pilotes de la devenue fondation *La main à la pâte*¹⁶. Adoubé par l'équipe locale en charge de missions à l'internationale, il m'a été demandé de bien vouloir porter à l'étranger, aux États Unis¹⁷ tout d'abord auprès de collègues du premier degré expatriés, les tenants et aboutissants de cette méthodologie pédagogique nouvellement reconnue par notre ministère de tutelle.

Par la suite, les sollicitations se sont portées sur l'Asie du Sud-Est où les nombreuses missions auront consisté à construire des modules pédagogiques avec nos homologues Cambodgiens, Vietnamiens et Laotiens adaptés à leur contexte respectif, et plus récemment en Corée du Sud. Cette collaboration active est menée avec le concours de la cellule VALOFRASE¹⁸ et l'implication financière de la fondation Mérieux. Il nous aura fallu trouver des synergies possibles entre chaque pays pour parvenir à identifier des invariants didactiques qui fassent l'unanimité et ainsi construire des outils pédagogiques convergents.

Voici décrites les circonstances dans lesquelles j'ai eu la possibilité de faire la connaissance de *Sarith*¹⁹. Il est inspecteur pour l'école primaire dans l'une des seize provinces du Cambodge avec une spécialité universitaire en Sciences et vie et de la Terre. Repéré par l'A.U.F (Agence Universitaire de la Francophonie), il est devenu le référent local de l'équipe des experts nationaux chargée de diffuser les bonnes pratiques de *La main à la pâte* dans son pays à Phnom Penh²⁰. Son travail et son investissement au Cambodge depuis dix ans maintenant lui ont valu d'être le lauréat cette année du prix très honorifique puRkwa²¹.

Notre collaboration s'est concrétisée par la réalisation de deux ouvrages pédagogiques²² pour les niveaux sixième et cinquième (soit CM1 et CM2) validés par le ministère de l'éducation nationale du Cambodge. Tous les enseignants des classes bilingues du pays ont été

¹² Prochiantz (2008) p44 «La pensée est le rapport adaptatif entre le vivant et son milieu »

¹³ J'ai au début de ma carrière été sollicité pour co-construire un petit ouvrage sur l'enseignement des disciplines scientifiques sous la forme d'un mémo : Déplanche et Fleury (1994)

¹⁴ Je rends hommage ici à tous les P.E.M.F (Professeur des Écoles Maître Formateur) qui m'ont accepté dans leur classe afin de mieux comprendre leur métier ;

¹⁵ BO HS N°1 du 14/02/2002

¹⁶ Traduction directe de l'expression américaine « *Hands on* »

¹⁷ Par deux fois j'ai été amené à diriger des stages de formations continues à Washington regroupant des collègues venant de l'ensemble du territoire Nord-Américain.

¹⁸ VALOFRASE (Valorisation du Français en Asie du Sud-Est) est une cellule gérée par l'action culturelle de l'ambassade de France localisée à Phnom Penh (Cambodge).

¹⁹ Bun Sartith (Nom Prénom)

²⁰ Capitale du Cambodge

²¹ Le prix puRkwa est délivré conjointement par l'Académie des sciences et l'École nationale supérieure des mines, prix qui récompense la capacité à faire de la Science, un véritable vecteur d'intégration citoyenne et un moteur de progrès économique et social. La remise du prix a eu lieu en octobre cette année.

²² Deux collègues PEMF en particulier ont participé également à ce travail J-L Alayrac et F.Lusignan.

destinataires de ces ouvrages qui décrivent les différents modules à mettre en œuvre dans les classes. Ils sont désormais les référents²³ des programmes officiels pour ce qui est de l'enseignement scientifique. Un jeu de malles de matériel pédagogique, pour chaque module, a été mis à disposition de chaque groupe d'écoles, et permet aux enfants de réaliser de nombreuses expériences qui sont susceptibles de répondre aux problématiques qui ont été conçues.

Comment construire au mieux de l'investigation scientifique ? En quoi cela participe-t-il à l'épanouissement d'un individu ? Quel devrait-être le rôle de l'adulte dans un tel environnement didactique ?

C'est en échangeant et collaborant avec passion et enthousiasme aux côtés de tous ces collègues étrangers et particulièrement avec *Sarith*, que m'a été donnée la possibilité de comprendre en quoi le poids d'un contexte local pouvait influencer les choix didactiques et les angles d'attaque, en quoi cet outil pouvait libérer l'esprit (d'un peuple martyr et encore profondément marqué par son Histoire), en quoi l'outil, contrairement aux apparences parfois stéréotypées, était d'une grande souplesse. Il y a dans cette rencontre le point de départ d'une remise en question profonde de mes pratiques, de mes convictions supposées, ce qui permet de relativiser, indispensable attitude quand on prétend tutoyer la position du chercheur.

Il y a au-delà de cette expérience professionnelle richissime, une histoire d'amitié et d'affection pour un être fragile au sourire permanent, qui évolue dans des conditions de vie précaires.

Son courage force l'admiration et m'a invité à devenir plus humble et je l'espère plus lucide.

[Fin de la seconde histoire].

I-3 L'histoire théâtralisée par *Maina*

Que de rencontres fructueuses durant ces dix dernières années passées aux côtés de P.E.M.F (Professeur des écoles maîtres formateurs) toujours disposés à échanger sur nos pratiques. En 2008 mon mémoire²⁴ de master²⁵ a été l'occasion de re-solliciter deux collègues²⁶ enseignantes à l'école maternelle pour travailler sur la thématique « Lourd-léger » avec leur classe de PS/MS et MS/GS²⁷.

La proposition de scénario devait permettre aux enfants d'aborder le concept de masse par tâtonnements opératoires liés à des petits défis simples. Ils disposaient pour cela d'une balance construite pour l'occasion, munie d'un pied central. Deux petites tiges verticales équidistantes du pivot leur permettaient d'empiler des écrous de trois sortes (masses) différentes. Durant cette séquence d'apprentissage les enfants se sont rendus compte, entre autres, que la collection d'écrous la plus lourde était systématiquement « en bas » et ce quel que soit le nombre et la position des écrous des collections choisies. Ainsi, les paramètres nombre, ordre d'empilement, côté de la balance, mais aussi forme, couleur, n'étaient pas des paramètres recevables quant à l'identification de la collection la plus lourde qui invariablement se retrouve en contact avec le sol.

Tout le long de la séquence les élèves ont dû systématiquement communiquer par le biais de représentations écrites. À cet âge plus particulièrement la dictée à l'adulte est indispensable

²³ L'équivalent des documents d'accompagnements des programmes de 2002 mais déclinés pour tous les modules

²⁴ « Comment l'enseignement proposé aujourd'hui, au cycle premier des apprentissages, peut-il favoriser des pratiques de pensée ? » Master : *Education et Cognition*

²⁵ Master Sciences cognitives - Option Éducation et cognition (Bordeaux II)

²⁶ Mmes Dagos et Fraczczsinki PEMF à Clos Chassaing (école d'application pour la maternelle à Périgueux dirigée par Mme Morigny) – je les salue toutes les trois chaleureusement ici de nouveau.

²⁷ PS : petite section ; MS : moyenne section ; GS : grande section

pour réduire l'écart entre l'interprétation de l'enseignant en première lecture et la représentation de l'enfant. Ce qui nous est donné à voir et entendre, ne saurait être pris comme le cheminement intérieur *certain*, du sujet.

Afin de pouvoir observer le niveau d'acquisition de ce concept, en fin de séquence, une lecture d'un album²⁸ a été entreprise. L'histoire raconte le désir d'un éléphant de vouloir jouer à la balançoire (tape-cul) sans pouvoir y parvenir malgré l'aide de nombreux animaux qui se positionnent tous de l'autre côté de la planche ; l'arrivée soudaine d'un petit coléoptère²⁹ se posant sur le nez d'un des animaux (la souris) suffira à faire basculer la balançoire.

Les enfants ont été invités à représenter la situation, avant, et après l'arrivée de l'insecte. S'en est suivi tout un débat sur la cohérence des différents éléments composant les représentations choisies. C'est à l'issue de ce débat que, demandant la parole, *Maïna* s'est exprimée ainsi, devant ses camarades et nous-mêmes, les premiers joyeux à l'idée de répéter pour eux ce qu'ils venaient d'entendre et de voir, les seconds, oscillants entre admiration et incrédulité.

[« *Maîtresse, j'ai compris, pour que tout le monde balance, il faut que le coléoptère il va sur le nez de la souris et il s'en va et il revient, comme ça l'éléphant il est plus lourd et après il est plus léger* »].

Maïna accompagna son explication d'une gestuelle utilisant son propre nez (celui de la souris) et sa main (simulant l'insecte) en explicitant les envols et atterrissages successifs du coléoptère. Voilà comment, elle venait de comprendre la manière dont l'éléphant pouvait se balancer avec ses amis, et de traduire son explication : limpide et unanimement partagée au sein du groupe.

En quoi de telles représentations peuvent-elles participer à la construction d'un concept (ici celui de la masse) ? Ya-t-il des indices, des acteurs didactiques, des facteurs cognitifs, susceptibles de faciliter cette construction ?

La coordination entre voix et geste, la simplicité du fond au service d'une forme aussi riche de sens, ne cesse de m'interroger quant au rôle à donner aux représentations lors d'une situation d'apprentissage.

[Fin de la troisième histoire].

I-4 Bilan de ces trois petites histoires

La première histoire interroge directement le champ des sciences cognitives. Sans doute pourra-t-on convenir qu'une émergence puisse être un symptôme (extérieur décelable) favorable dans l'acquisition d'un savoir. Il ne s'agit pas ici d'imaginer pouvoir identifier la zone du cortex où « les choses se passent ». Si l'imagerie médicale a des vertus avérées, il ne serait être question de vouloir *trouver dieu*³⁰ quelque part entre deux zones neuronales. En revanche tenter de repérer des indices extérieurs, révélateurs d'un processus interne, de la présence d'une émergence, paraît envisageable. Cela pourrait par ailleurs nous guider vers les conditions environnementales favorables, dans lesquelles l'émergence pourrait avoir lieu.

Nous ne perdons pas de vue que la matière sur laquelle nous allons travailler étant vivante, toutes conclusions hâtives seraient particulièrement malvenues, mais pour autant, rien ne nous interdit de porter quelques convictions, dont certaines pourraient devenir intimes.

²⁸ Tombert (1995) « Un petit coup de main »

²⁹ Insecte à élytres (ailes durcies comme pour la coccinelle)

³⁰ La recherche en imagerie médicale est de plus en plus axée sur l'identification de zones fonctionnelles du cortex ; peut-on imaginer que l'on puisse pointer une zone, « un point » du cerveau dans une architecture aussi interconnectée ? On touche ici à une approche philosophique voire fondamentaliste !!

L'apport des sciences cognitives se pose à ce stade comme tout à fait incontournable dans la mesure où l'étude porte sur « le sujet ». Il nous faudra identifier comment observer de l'extérieur un cheminement intérieur tout en acceptant l'inévitable déperdition d'informations due à ce transfert.

La seconde histoire renvoie aux circonstances dans lesquelles nous imaginons recueillir nos données. Elle doit nous permettre d'approcher le scénario didactique le plus approprié pour que les « bruits de fond³¹ » soient minimisés. L'investigation fait désormais partie de notre paysage éducatif de l'école au lycée. Elle s'est invitée dans l'hexagone « par hasard³² » et a depuis fait son chemin. Identifiée au préalable, par certains, comme un abandon de l'autorité du maître, l'outil pédagogique, au fur et à mesure de son appropriation, tente de faire ses preuves, mais sans véritablement rassurer complètement la communauté enseignante. Elle est vraisemblablement un moyen qui facilite l'observation des effets de la liberté laissée aux élèves, c'est-à-dire de « ce qui se passe en eux », dans ces phases durant lesquelles ils peuvent s'exprimer et extérioriser³³. Reste à identifier comment récupérer ces outils sensibles : les indices de nos deux « ex ».

La troisième histoire qui relate la construction d'un concept scientifique, celui de la masse, porte l'idée selon laquelle le support « représentation » peut contenir les indices convoités.

Ces trois petites histoires se font écho les unes aux autres car elles sont intimement liées.

En effet, ce sont les invariants dans les attitudes comportementales des papillons, qui m'ont permis de mieux les comprendre. Ce sont en outre, les recherches d'invariants dans nos approches didactiques, lors de la construction d'outils communs en Asie du Sud-Est, qui nous ont permis de mieux nous faire comprendre. Ce sont enfin, les invariants dans les représentations des élèves qui nous ont permis de mieux nous adapter à ces derniers. De ces différents constats et de bien d'autres, « la question de l'invariant » s'affiche comme une idée centrale. C'est ainsi qu'à partir de ces différentes observations, il est apparu digne d'intérêt de mettre à l'épreuve de l'invariant la construction (voire l'émergence) des concepts scientifiques, objets les plus complexes qu'on m'ait donnés à transmettre.

Nous pensons désormais savoir *quoi rechercher* - les conditions d'émergence d'un concept scientifique, *qui chercher* - l'invariant (voire les invariants) ou des indices de sa (leur) construction, *où chercher* - dans les représentations, *comment chercher* - proposer entre autre de l'investigation.

Pour poursuivre ce chapitre, nous allons décortiquer le comment, en s'attardant un peu sur ce que souhaiterait véhiculer la démarche par investigation.

II- Tenants et aboutissants d'une méthodologie pédagogique

Que n'a-t-on pas tenté depuis des années sur le plan pédagogique ! Eprouver de nouvelles méthodes de fonctionnement pour répondre aux évolutions de la société est devenu un souci permanent ; se télescopent les attendus des programmes, les réalités des quotidiens des différents acteurs et les modèles de formations³⁴ des enseignants. Dans ce labyrinthe et ce parcours d'obstacles, les malaises conduisent à des attitudes diverses allant de la démission³⁵, à la résistance, ou encore à la recherche d'innovation.

³¹ Signaux indésirables qui altèrent l'écoute d'un signal

³² C'est notre prix Nobel (1992) G.Charpak qui importa l'idée des Etats Unis en 1995 après une visite de classe à Chicago observant ainsi ce que son homologue Léon Max Lederman avait alors mis en place.

³³ En latin *ex* signifie dehors ou en dehors

³⁴ Ferry (1983) présente trois modèles de formation (homomorphique – isomorphique - polymorphique)

³⁵ L'abandon des enseignants est l'une des cinq principales préoccupations de l'UNESCO (AFIRSE 2011: discours de M. Atchoarena Spécialiste Principal du Programme à l'Institut International de Planification de l'Education de l'UNESCO responsable de l'unité Enseignement supérieur et Formation spécialisée.)

Les problématiques sociales de plus en plus complexes se sont invitées par effraction à l'école l'obligeant à s'adapter pour garder avec elle un public désormais « non-acquis ».

L'autorité naturelle, reconnue jadis des enseignants, n'est plus. Il faut aujourd'hui composer avec un auditoire qu'il faut convaincre. Cette obligation est souvent ressentie par les enseignants, comme un aveu de faiblesse, un statut qui leur échappe. Lâcher du lest, mais pas trop, afin que chacun se sente bien à la place qui est la sienne, tout en répondant aux attentes institutionnelles, fait partie de ce qui anime les équipes pédagogiques aujourd'hui.

II-1 L'avènement de la démarche par investigation

À Chicago, dans le début des années 90, une expérimentation a vu le jour à l'initiative d'établissements scolaires confrontée à un public plutôt hostile (celui-ci refusant de reconnaître l'autorité du maître). L'idée générale pourrait se mesurer à cette réflexion que me fit un collègue « *Puisque les élèves ne souhaitent pas que je fasse la classe alors ce sont eux qui vont la faire à ma place* ».

Attention ! Ne nous n'y trompons pas : il ne s'agit pas de proposer une substitution de statut, mais d'organiser des espaces d'expressions pour que les enfants se sentent plus et mieux concernés par le discours de l'adulte. Ce dernier « manage » le groupe qui le guide dans ses discours et ses choix ; le groupe ainsi légitime le maître dans sa fonction de régulation et de référent. À l'invitation des Etats Unis, G.Charpak³⁶ fut séduit par cette méthodologie qui s'inspire de la théorie de la médiation³⁷ et précède l'avènement de « l'action conjointe »³⁸.

Bruner (1996) dans une approche constructiviste relevant de la théorie de la médiation, décrit ce qui selon lui devrait aider les enseignants confrontés à des contextes difficiles. Nous allons ici donner les principales lignes directrices des propositions de Bruner qui s'inscrivent dans la lignée du « Comment transmettre ? »³⁹.

Partant du principe qu'il existe une *technologie légère* du bon enseignement, Bruner avance quelques fondamentaux dont les principaux sont les suivants :

- Il existe « ...une technologie qui replacerait l'accent sur le processus par lequel la science résout les problèmes et non sur la science achevée et sur ses « réponses » »⁴⁰. Il faut faire converger le groupe vers le besoin, l'envie de résoudre un problème qui sera source de motivation.

- Par la suite, l'auteur nous indique qu'une théorie scientifique « ...devrait mener à la formulation d'hypothèses falsifiables.. »⁴¹.

Il faut donner la possibilité aux enfants d'émettre des hypothèses qui pourront être testées ensemble. L'hypothèse est un piège que l'on tend avec du flair pour tourner autour de la connaissance et tenter de la capturer⁴².

- Par ailleurs, la *vraie* science est celle qui « ..est immédiatement captée par les critères de vérifiabilité.. »⁴³.

Il faut créer les conditions expérimentales susceptibles de pouvoir répondre à nos hypothèses.

- Enfin, Bruner avance que : « Le processus de construction de la science est narratif »⁴⁴.

³⁶ Prix Nobel de physique en 1992.

³⁷ Cf. *infra* Chap II (I-4)

³⁸ Sensevy (2011)

³⁹ Morandi(1997) identifie trois types de formation : **Scientifique** (« Quoi transmettre ?») – **Pédagogique** («Comment transmettre ?») – **Psychopédagogique** (« Que faut-il pour enseigner ? »)

⁴⁰ Bruner (1996) p158-159

⁴¹ Bruner (1996) p153

⁴² Prochiantz (1995) p73

⁴³ Bruner (1996) p153

⁴⁴ Bruner (1996) p157

Ici est abordé le rôle essentiel des représentations⁴⁵ (cf. *infra* III) dans le processus d'apprentissage.

L'ensemble de ces fondamentaux est désormais intégré au sein des programmes de sciences dans notre pays ; il s'agit de donner toute sa place à l'écrit dans un processus de résolution d'une problématique. Force est de constater que cette méthodologie constructiviste basée sur la médiation n'est pas le domaine « réservé » des différents champs disciplinaires scientifiques. Brousseau (1981b) a proposé une typologie pour les mathématiques qui a influencé les travaux dans ce domaine en distinguant quatre étapes de situations : *d'action, de formulation, de validation et d'institutionnalisation*.

Si l'association (devenue récemment fondation) « La main à la pâte »⁴⁶ a su relayer en France ces fondamentaux et convaincre le ministère de l'éducation nationale d'intégrer « les bonnes pratiques » dans les programmes du premier et désormais du second degré, on peut s'interroger sur la raison pour laquelle, les seuls enseignements scientifiques devraient être concernés par cette méthodologie dont voici les dix principes⁴⁷ défendus par la désormais fondation.

La démarche pédagogique

1. *Les enfants observent un objet ou un phénomène du monde réel, proche et sensible, et expérimentent sur lui.*
2. *Au cours de leurs investigations, les enfants argumentent et raisonnent, mettent en commun et discutent leurs idées et leurs résultats, construisent leurs connaissances, une activité purement manuelle ne suffisant pas.*
3. *Les activités proposées aux élèves par le maître sont organisées en séquence en vue d'une progression des apprentissages. Elles relèvent des programmes et laissent une large part à l'autonomie des élèves.*
4. *Un volume minimum de deux heures par semaine est consacré à un même thème pendant plusieurs semaines. Une continuité des activités et des méthodes pédagogiques est assurée sur l'ensemble de la scolarité.*
5. *Les enfants tiennent chacun un cahier d'expériences avec leurs mots à eux.*
6. *L'objectif majeur est une appropriation progressive, par les élèves, de concepts scientifiques et de techniques opératoires, accompagnée d'une consolidation de l'expression écrite et orale.*

Le partenariat

7. *Les familles et/ou le quartier sont sollicités pour le travail réalisé en classe.*
8. *Localement, des partenaires scientifiques (universités, grandes écoles) accompagnent le travail de la classe en mettant leurs compétences à disposition.*
9. *Localement, les IUFM mettent leur expérience pédagogique et didactique au service de l'enseignant.*
10. *L'enseignant peut obtenir, auprès du site Internet, des modules à mettre en œuvre, des idées d'activités, des réponses à ses questions. Il peut aussi participer à un travail coopératif en dialoguant avec des collègues, des formateurs et des scientifiques.*

⁴⁵ La représentation est interrogée dans le troisième chapitre dans sa dimension de concept et de catégorisation.

⁴⁶ Association loi 1901 créée en 1996 à l'initiative de trois membres de l'académie des sciences G.Charpak – P.Léna – Y.Quéré qui font la promotion d'une méthodologie basée sur l'investigation sur la base de 10 principes qui sont le socle de cette pédagogie. Cette association a laissé place à une fondation de coopération scientifique dite Fondation la main à la pâte reconnue d'utilité publique. Elle a été créée par décret le 11 octobre 2011 (JO du 13 Octobre 2011).

⁴⁷ Extrait du site de la main à la pâte à l'adresse : http://www.lamap.fr/?Page_Id=59 consulté en 12/2011

La démarche préconise de contextualiser les activités afin que les élèves se sentent mieux concernés (Principe N°1) tout en les mettant en situation de recherche (Principe N°2) ; il est fait mention de l'importance de la liaison science et langage (Principes 5 et 6) ; enfin la médiation est soit implicite de par la position centrale donnée à l'élève (Principe N°2) soit explicite de par la nature des intervenants extérieurs à l'école (Principe N°7 -8 et 9).

Nous allons maintenant rentrer un peu plus avant dans les détails de cette méthode pédagogique en relatant ce que nous dit Bruner.

II-2 Résumé des coulisses de cette méthode pédagogique

La terminologie « méthode » ne doit pas laisser supposer qu'il s'agisse d'un système fermé qui serait trop fortement balisé⁴⁸. Le propre de l'investigation est qu'elle est un guide, lequel dérive, au gré de son avancée. Nous proposons de décrire succinctement un déroulement qui est en phase avec les grandes lignes directrices décrites précédemment par Bruner⁴⁹ et qui s'articule autour de cinq grandes étapes qui se succèdent les unes aux autres par *effets kairotiques*⁵⁰.

A/ L'entrée en matière (Faire émerger un problème) :

Ce départ crucial qui doit capter l'auditoire débouche alors sur un problème à résoudre.

Bruner prône comme entrée dans une situation d'apprentissage, l'utilisation de la provocation sous forme de questions qui créent un dilemme, qui ébranlent « nos vérités supposées », qui suscitent le doute, qui déstabilisent, bref, qui génèrent de l'incongruité, de l'effet de surprise.

À partir d'un support vidéo, d'une image, d'un document bien choisi, d'une observation, un débat collectif peut être engagé. Des questions (dites productives dans le sens où elles alimentent le débat et la réflexion générale) fusent et débouchent sur un problème partagé. Construire une problématique bien identifiée de tous et qui motive : tel pourrait être résumé le premier des dix principes. Il est aussi parfois pratique de lancer directement un défi collectif⁵¹. Celui-ci fait alors office de problématique immédiatement lisible par le groupe. Il est conçu comme un raccourci consistant à mettre son groupe en situation de recherche immédiate de résolutions possibles. Attention toutefois à ne pas trop en abuser sous peine de court-circuiter la phase (ô combien bénéfique !) qui aboutit au problème que le groupe construit de lui-même. Dans d'autres cas, le maître s'appuiera sur les connaissances préalables des élèves sur le sujet qu'il souhaite mettre en débat, afin d'amorcer les échanges (à partir des divergences de points de vue). Il est important de pouvoir construire du sens ; en cela cette étape ne peut pas être considérée comme secondaire car il en va de l'investissement des enfants et de leur enrôlement dans le projet du maître. Cette entrée en matière est trop souvent mal anticipée ou abordée de façon non prioritaire tombant alors dans l'artificiel. C'est la raison pour laquelle, un cahier d'expériences dès cette étape est utile. L'élève en écrivant le problème à résoudre⁵² dans son cahier s'imprègne de la direction à suivre, alors que l'adulte pourra, pour éventuellement le recadrer s'il s'égaré trop loin, faire référence à « ce bien commun ».

Si le départ appartient *a priori* à l'enseignant puisqu'il fait un choix la plupart du temps, rien ne peut lui garantir d'aboutir de manière certaine à une problématique « anticipée » par le

⁴⁸ Attention à ne pas tomber dans les stéréotypes (Morge et Toczek, 2012).

⁴⁹ Cf. *supra* Chap I (II-1)

⁵⁰ En Grec le kairos est « le moment opportun » lequel est souvent prédéfini par l'enseignant (terminologie utilisée par B.Calmettes lors des 7^{ème} rencontres scientifiques de l'ardist : Bordeaux mars 2012, acte)

⁵¹ Si la situation d'entrée peut déboucher sur un problème « non lisible » au départ à résoudre, elle peut aussi déterminer de manière plus explicite le but de l'investigation.

⁵² Afin de marquer un balisage qui facilite ce qui est en train de se jouer tout au long du scénario, il existe toute une série de clignotants qui précèdent chaque écrit : Exemples : Ce que nous cherchons – Ce que je pense – Ce que nous avons fait – Ce que je crois -

chemin qu'il a pensé emprunter. Il doit ici naviguer à *vue* en fonction des réactions spontanées des élèves et débroussailler la voie en utilisant leurs propos : l'enseignant improvise et parfois (sur-)guide sans en avoir l'air vers le (son) problème qui sera par la suite unanimement partagé par le groupe. C'est le paradoxe majeur de cette méthodologie (plus évident encore dans le second degré où la chronogénèse⁵³ prend parfois le pas sur l'essentiel car le temps est plus qu'ailleurs très strictement compté) de vouloir mettre le sujet en situation de liberté apparente quand la fin est déjà connue et programmée. *Les uns ne manqueront pas de pointer cet écueil en disant qu'il n'y a pas ici l'ombre d'une étape de recherche, que la démocratie n'est qu'apparente, que les enjeux sont au préalable connus et anticipés ; les autres répliqueront que mettre l'individu en situation de s'interroger, c'est déjà lui donner les moyens de pouvoir devenir autonome et d'acheter une parcelle, quelques arrhes de liberté.*

Cette approche de départ peut donner le sentiment à l'adulte qu'il se met *en danger*. Il serait naïf de croire que cette étape est simple à mener (et ce même si l'on sait où l'on veut aller⁵⁴) ; elle demande de la maturité professionnelle et impose de se sentir serein sur le concept scientifique abordé. Le propre du débat est d'évoluer en se confrontant à l'argumentation contradictoire. Gérer un débat d'une part tout en captant ce qui peut faire progresser le groupe vers le problème, qui petit à petit se dégage, est une compétence professionnelle difficile (on est ici sur un domaine à la frontière entre *maîtrise* et *expertise*⁵⁵). Le conflit est bien de ce point de vue sociocognitif. La situation fait appel à ses propres connaissances (aspect social) tout en suscitant des émergences telles des feux-follets qui animent et enrichissent⁵⁶ l'activité cognitive. Là commence « notre » (celle du groupe) histoire ; si le problème se dégage à l'issue de cette première phase, les échanges s'ils demeurent oraux et collectifs ne permettent pas de le stabiliser clairement. Le passage par l'écrit suscite une mise à distance et donne une lecture plus fidèle de ce qui aura été appréhendé individuellement. Partons désormais de l'idée que le problème est identifié dans sa formulation ; reste à tenter de le résoudre. Comme nous le fait remarquer Sensevy (2011) : « Si je veux comprendre l'action de cet homme qui court dans un lieu entouré de gradins surpeuplés le long d'une ligne blanche, un ballon que je peux distinguer comme ovale sous le bras, j'ai intérêt à saisir le fait qu'il joue au rugby »⁵⁷. Mieux vaut être d'accord sur l'objet, le problème, faute de quoi, on risque fort de ne pas se comprendre !!

B/ Émettre des hypothèses (Faire des propositions pour résoudre le problème)

L'identification d'un problème sous-tend que l'on puisse formuler des hypothèses pour tenter d'y répondre. Celles-ci peuvent être formulées, seul(e), sur son cahier d'expériences et/ou à plusieurs par la suite, pour en faire une présentation à la classe. Cette première confrontation est l'occasion d'observer les différentes hypothèses émises, d'enrichir les siennes, de les infléchir, ou de les conforter. Tous ces écrits participent à la construction d'une démarche qui permet à chacun d'aller *au-delà*⁵⁸ de son propre savoir, des apparences, tout en manifestant par écrit ses propres interrogations (hypothèses).

Pour se faire, Bruner suggère sans équivoque, que le passage par l'émission d'hypothèses falsifiables soit retenu. L'emploi du pluriel montre indirectement une richesse qu'il faut

⁵³ Sensevy (2011)

⁵⁴ Connaître « la fin », ce à quoi il faut aboutir *in fine* est de nature à guider et à rassurer

⁵⁵ Tout le monde ne peut pas avec agilité et élégance répondre à *la règle des 3i*, à savoir, faire preuve, d'*improvisation*, d'*imagination* et d'*intuition*.

⁵⁶ Au sens de Sensevy (2011) qui propose un nouveau paradigme de l'action conjointe

⁵⁷ Sensevy (2011) p29

⁵⁸ Bruner (1996) p 160 utilise ce terme par trois fois en quelques lignes : le premier pour expliquer l'intérêt de formuler une hypothèse dans l'accession d'un savoir nouveau – la seconde pour expliquer l'importance d'une « bonne question » qui impose de faire appel à autre chose que son propre vécu – la troisième pour expliquer l'obligation qui nous est faite d'aller chercher ce qui n'est pas explicite mais implicite (le signifié).

susciter ; celle-ci en générale est obtenue après concertation dans des petits groupes d'élèves (mais elle peut aussi être obtenue tous ensemble). L'emploi de l'adjectif « falsifiables » impose deux idées maîtresses. La première est qu'une hypothèse n'a pas vocation à nous diriger vers « la vérité ». La seconde est que le propre d'une hypothèse (à l'école) est de pouvoir être éprouvée. Ainsi, toutes les hypothèses doivent passer le test préalable de faisabilité.

C/ Expérimenter (Mettre à l'épreuve ses hypothèses)

Selon Bruner c'est à partir d'une approche *intuitive* bien choisie au regard des aptitudes cognitives d'un sujet qu'un savoir peut se construire (il avance en réalité ici ce qui relève du quotidien des scientifiques, à savoir que leurs travaux de recherche sont basés essentiellement sur leur *intuition* et que les observations sont relayées au second plan dans le sens où elles guident et informent mais ne précèdent pas les idées). Or il est fréquent d'entendre qu'une méthode basée sur l'observation pourrait être retenue à l'école (il existe même une terminologie nommée O.H.E.R.I.C devenue par la suite O.P.H.E.R.I.C⁵⁹. L'observation peut-elle raisonnablement être « première » ?

Quoi qu'il en soit, le problème à résoudre, lui, demeure. La recherche d'activités désormais va prendre le pas sur les interrogations formulées. Il s'agit ici de donner les moyens aux élèves de pouvoir éprouver concrètement leurs idées en général sous forme expérimentale pour qu'ils puissent apporter des réponses à leurs interrogations. La classe est alors invitée à expérimenter avec du matériel pédagogique. Chaque groupe, à partir d'une liste de matériel qu'il a dressée au préalable, réalise son expérience. Il est possible aussi de mettre à disposition des élèves sur une table du matériel. Les groupes doivent alors choisir parmi l'existant préparé (anticipé) par le maître, ce qui leur paraît être pertinent pour éprouver leur hypothèse. Les élèves manipulent des outils, construisent des opérations sur les objets qu'ils détiennent et utilisent les logiques causales pour dégager des idées. Celles-ci se construisent et se formalisent par des représentations⁶⁰ qui témoignent de l'émulation cognitive du groupe et d'une aptitude essentielle qui est de rendre compte des expérimentations et de leurs résultats (de leur interprétation).

D/ Mutualiser les expérimentations (Rendre compte de son travail)

Chaque groupe est invité à construire un affichage de dimension appropriée (ou l'utilisation de l'environnement numérique de la classe à partir de tablettes) permettant de débattre tous ensemble des résultats obtenus.

Tous les résultats sont alors débattus ensemble lors d'une phase de mutualisation où le rôle de l'enseignant est crucial. Comment libérer « l'espace » tout en étant le garant de son efficacité - s'effacer pour mieux faire émerger l'essentiel – là encore l'exercice se révèle délicat.

La richesse des échanges qui s'en suivent peut orienter la classe vers l'idée qu'une solution au problème de départ a été trouvée. Si cela n'est pas le cas, de nouvelles hypothèses seront alors formulées et éprouvées par la suite.

Nous avons là, dans le scénario général, une possibilité de boucle rétroactive indirecte mettant en jeu de l'information de type déstabilisatrice⁶¹, digne d'une approche qui fait des enfants, des *apprentis-chercheurs*. En effet, les tâtonnements des élèves, les fausses-pistes, sont autant d'apports qui participent à l'élaboration du savoir commun ; l'investigation nourrit l'investigation et la renforce : en cela la méthode met en avant la fonction positive des variations de l'effet. Déstabiliser certes mais pour mieux stabiliser par la suite.

⁵⁹ Observation – Problème – Hypothèses – Expériences – Résultats – Interprétations- Conclusions

⁶⁰ Cf. *infra* Chap II

⁶¹ De Latil (1991) il s'agit de l'une des cinq rétroactions dont trois sont directes et deux indirectes pp 33-46.

E/ Stabiliser un savoir (Apporter une réponse au problème de départ)

Enfin, le groupe, fort des apports des uns et des autres, est alors en mesure de rendre compte de sa capacité à avoir pu résoudre le problème de départ. Dans la négative de nouvelles investigations seront conduites pour y parvenir. Cette boucle rétroactive est un des témoignages d'un apprentissage en construction.

Le savoir construit à l'issue de cette méthodologie peut être *in fine* institutionnalisé. Il fait l'objet d'une représentation « officielle » dans le cahier d'expériences. Le statut de cette représentation n'est alors plus négociable sur le fond.

Cette méthodologie est jalonnée par des phases d'écritures qu'elles soient individuelles ou collectives nécessitant « de se poser » et d'interroger de manière précise les situations.

Toutefois, faute de temps, les situations proposées sont souvent semi-fermées, ou semi-ouvertes selon l'indulgence que l'on porte. La tentation d'ouvrir une situation et de la refermer ensuite est forte (ce qui se traduit en général par une uniformité des activités menées) et fait perdre de son sens à l'outil pédagogique lui-même.

Enfin, et malgré les obstacles et les contraintes, il faut saluer la volonté des enseignants qui rivalisent d'imagination et donnent de plus en plus à leurs élèves de véritables espaces d'expression dans lesquels ceux-ci s'engouffrent avec bonheur tout en utilisant des cheminements divers et variés.

Nous souhaitons ici faire écho à la *théorie de l'action conjointe* portée par Sensevy (2011).

Ce chercheur nous indique que la construction d'un savoir s'effectue dans un jeu d'allers retours entre le maître et ses élèves et que, si l'action du premier donne le tempo⁶², les seconds par leur action en retour, dévient le cours de notre préparation, nous imposant de prendre parfois des chemins de traverses. Il y a là un point d'inflexion dans la relation entre l'adulte et son groupe trop souvent pensée comme auto-inductif⁶³. Il n'y a pas d'opposition entre les acteurs dans *l'esprit d'investigation* bien au contraire. Cette auto-induction redoutée par les collègues peut expliquer en partie pourquoi il existe ce niveau de réticence à partager les rênes de l'attelage. Sensevy nous explique que les acteurs se déplacent les uns les autres sur un échiquier tout en vivant dans un espace d'équilibre, de tolérance et de prise en considération mutuelle. *L'action conjointe* se pose comme un principe implicite de l'outil pédagogique imaginé par nos trois académiciens.

« Tu as besoin de moi autant que j'ai besoin de toi », ce qui pourrait s'imaginer par l'expression suivante : « sans capteur pas de pression ».

Sensevy, dans sa proposition pose comme bases que l'action conjointe est *coordination* et *ajustement mutuel*, qu'elle nous permet de rendre compte de l'intentionnalité des acteurs.

Dans la démarche pédagogique présentée précédemment cette réciprocité est obtenue de manière très prégnante (quelle jubilation de ne pas connaître à l'avance le scénario !⁶⁴).

Sportifs, acteurs, enseignants, tous victimes « heureuses » de ces petites montées d'adrénaline qui sont autant de symptômes des aléas des *actions participatives* de nos partenaires.

Vive l'anastomose !!

II-3 Les enjeux qui gravitent autour de l'investigation scientifique

Cet outil pédagogique est un véritable succès ; il convainc de nombreux pays partout dans le monde. Des Etats Unis à la Chine, l'Afghanistan, ou encore au Laos et en Corée du Sud, les formateurs français sollicités par la fondation « La main à la pâte » parcourent la planète pour

⁶² Dans l'investigation les rôles sont effectivement dissymétriques : Sensevy (2011) p56

⁶³ L'auto-induction est la propriété électromagnétique, que possède un conducteur parcouru par un courant électrique, de s'opposer aux variations de celui-ci.

⁶⁴ Antheaume (2001) aborde la difficulté à gérer l'imprévisible.

porter les fondamentaux de cette méthodologie qui ne se dément pas, tout en l'adaptant aux différents contextes locaux⁶⁵.

Depuis plusieurs années, apparaissent des abréviations diverses et variées en lien avec une méthodologie pédagogique dite d'avenir.

L'E.I.S.T (Enseignement intégré de science et technologie) apparaît dès 2006 répondant ainsi à la loi d'orientation et de programme pour l'avenir de l'École du 23 avril 2005.

L'I.B.S.E (Inquiry- Based Science Education) apparaît en 2007 avec le rapport Rocard⁶⁶ ; ce travail est consécutif d'une actualité et d'un constat : la désaffection, le désintérêt des élèves (particulièrement chez les filles) pour les filières « scientifiques ». Ainsi les mouvements de vulgarisation et de muséologie⁶⁷ vont être des vecteurs de promotions des sciences dans notre pays et bien au-delà. Ce rapport est suivi, par l'E.S.F.I⁶⁸ (Enseignement des Sciences Fondé sur l'Investigation). Il s'agit ici de décrire de manière opérationnelle les attendus des différentes étapes de la démarche en rappelant des recommandations sur les liens qui peuvent être tissés avec le monde extérieur à l'école. C'est dans l'esprit du dernier point que l'A.S.T.E.P⁶⁹ (Accompagnement en Sciences et Technologie à l'École Primaire) voit le jour dès 2001. Les scientifiques sont invités, en tant que témoins et acteurs d'une science en perpétuelle évolution, à devenir des partenaires et à accompagner dans le premier degré les collègues professeurs des écoles en classe et en dehors.

Aux États-Unis le programme S.T.E.M⁷⁰ (Science Technology Engineering Mathematics) qui se déroule en dehors des cours après la classe est très largement parrainé par des entreprises privées à la pointe de la technologie. Elles investissent massivement avec l'idée que la sollicitation proposée par l'investigation forme l'esprit scientifique, lequel se cultive et doit devenir un enjeu culturel.

En Corée du Sud⁷¹ l'éducation nationale s'est peu investie financièrement pour cette méthodologie. Les enfants pratiquent des activités scientifiques « à l'école - après l'école » encadrés par des associations ou des personnels de la municipalité. C'est la K.O.F.A.C (Korea Foundation for the Advancement of Science and Creativity) qui pousse le gouvernement à inciter les enseignements vers l'investigation, pensant à raison, me semble-t-il, qu'elle sera un terrain fertile pour l'imagination et la créativité.

L'investigation est considérée un peu partout dans le monde comme un investissement d'avenir. Une société qui invite les enfants dès leur plus jeune âge, à donner libre cours à leur imagination, à exprimer leurs idées, à prendre l'habitude de raisonner, est une société qui se

⁶⁵ En 2009, VALOFRASE, qui est une cellule localisée en Asie du Sud-Est gérée par l'action culturelle de l'ambassade de France à Phnom Penh m'a demandé de trouver des synergies possibles entre le Laos, le Cambodge et le Vietnam dans leurs méthodologies pédagogiques. Ce travail a été formalisé avec un document destiné aux enseignants de cette région du monde qui donne un cadre s'agissant des attendus de cette pédagogie qui se revendique de la théorie de la médiation. Les Vietnamiens étant plus enclin à laisser de l'espace aux élèves il a fallu trouver des compromis pour que chaque pays puisse se retrouver dans l'outil final (cf. *site internet de VALOFRASE* <http://www.valofrase.org/>) consulté en 12/2011

⁶⁶ Michel Rocard (membre du parlement européen et ancien premier ministre français) a dirigé à la demande de la commission européenne une étude sur « L'enseignement scientifique aujourd'hui : Une pédagogie renouvelée pour l'avenir de l'Europe » (2007) (cf. <http://ec.europa.eu/research/science-society>) consulté en 12/2011

⁶⁷ Exemple avec CAPSCIENCE sur Bordeaux qui s'est considérablement développé avec le soutien ministériel

⁶⁸ À partir de l'abréviation I.B.S.E, l'association La main à la pâte propose l'abréviation E.S.F.I : (2009) dans un ouvrage collectif (2009) qui peut être considéré comme une « réponse » au rapport Rocard.

⁶⁹ Cet accompagnement propose aux scientifiques de s'engager auprès des enseignants (cf. <http://www.lamap.fr/astep>) consulté en 12/2011

⁷⁰ La coalition éducative pour ce programme est de valoriser l'initiative individuelle

⁷¹ J'ai été invité en Aout 2011 par la K.O.F.A.C pour co-organiser une formation continue prônant l'intérêt de l'investigation scientifique à Daegu pour quarante professeurs des écoles qui évoluent dans des zones identifiées sensibles.

donne les moyens de construire sa propre liberté. Bien sûr, l'investigation scientifique demande un véritable engagement et un réel investissement.

Comme l'indique⁷² notre académicien, co-fondateur de « La main à la pâte », Léna : « Nous devons leur apprendre à prélever, organiser, comprendre, exploiter l'information surabondante qui les entoure, à aimer cette intelligence du monde que donne la science » et plus loin il ajoute :

« Trois voies prometteuses et enthousiasmantes peuvent remettre l'éducation en phase avec la science et le rôle social que celle-ci peut et doit jouer : une transformation de la pédagogie, le développement professionnel des professeurs au contact de la science vivante et de ses acteurs, une conception plus globale du savoir ».

Puis il donne quelques contours de l'outil en lui prêtant l'habit d'un « ... mélange subtil d'inductif et de déductif, pratiqué avec bonheur par l'élève ».

Léna dit que cette pédagogie nouvelle basée sur l'investigation permet d'acquérir « Les compétences d'observation et de raisonnement... » qui contribuent à « ...découvrir la nature même de la science ».

Faisant enfin l'amer constat qu'aujourd'hui : « il demeure encore plus de la moitié de nos classes primaires françaises où les sciences de la nature, figurant pourtant dans les obligations du programme, ne sont pas enseignées ! », il conclut en invitant le politique à méditer sur ce qu'il considère comme étant «..les quatre fondamentaux de l'école du XXI^e siècle », à savoir :

« Lire, écrire, compter, raisonner ».

Et si l'investigation scientifique devenait l'investigation « tout court » !! Les quatre verbes énoncés par Léna sont-ils si spécifiques d'un enseignement scientifique ?

Il paraît à première vue que les fondamentaux de cette méthode pédagogique débordent très largement de la sphère des sciences. Nous formulerons pour le moins l'hypothèse, qu'ils sont des atouts indispensables, devant faciliter l'émergence des objets complexes que sont les concepts scientifiques. En Angleterre depuis 2006, les *National Science Learning Centers* réussissent à inverser la tendance de désaffection des filières scientifiques. C'est ainsi que l'académie des sciences a proposé la mise en place dès la rentrée 2012 des « Maisons de science »⁷³ sur plusieurs académies pilotes. Ces structures sont au service des enseignants du premier et second degré où le partage du savoir entre pédagogues et scientifiques doit permettre d'améliorer le dialogue entre ces deux mondes afin de parfaire l'auto-formation.

Le chapitre qui suit interroge les différents paradigmes de l'apprentissage, en tentant de décrire leurs attributs respectifs, ce qui permettra de mieux positionner ceux sur lesquels nous portons un regard « intéressé » : les paradigmes, de la médiation, et du connexionnisme.

Didacticiens, didacticiennes, connexionnistes convaincus ou en passe de l'être : bienvenue au pays des ocelles⁷⁴ et des tardigrades⁷⁵ !

⁷² Séance solennelle du Mardi 1^{er} Mars 2011 à l'Académie des Sciences sur : Les nouveaux défis de l'éducation : « La science en héritage » par Léna Pierre.

⁷³ Léna (2012)

⁷⁴ Un ocelle est une tâche colorée très répandue dans le règne animal, un *invariant* singulier très utile dans l'art du mimétisme et qui participe activement à la survie.

⁷⁵ Petits organismes vivants, surnommés *les oursons d'eau*, qui sont les « champions du monde » de l'adaptation et de la survie.

Chapitre II Les théories de l'apprentissage

Synthèse du chapitre

Nous présentons les six paradigmes de l'apprentissage, en mettant l'accent sur leurs attributs respectifs. Nous engageons une réflexion à partir des apports récents, ceux portés par Varela et de l'énaction, pour laquelle l'émergence du monde est à la fois consécutive et simultanée de celle du sujet.

Être convaincu par un paradigme ne signifie pas pour autant abandonner les autres. S'intéresser aux autres ne signifie pas non plus renier ses convictions.

Ne peut-on pas, dès lors, avancer l'idée selon laquelle : « *Enseigner, c'est rechercher à valoriser chaque paradigme pour en tirer le meilleur* ».

Tout enseignant dans sa carrière est confronté à des contextes différents : cela peut aller du nombre d'élèves par classe, à l'environnement économique et social local, en passant par la structure de l'établissement, à l'existence de classe multi-âges, à la présence d'enfants relevant d'un handicap, pour n'en évoquer que quelques-uns.

En tant que formateur il me semble essentiel pour pouvoir accompagner nos jeunes collègues de prendre connaissance de leur contexte de travail.

Or, les préoccupations premières chez les jeunes enseignants (que l'on peut comprendre) sont instinctivement plus souvent axées sur les contenus que sur les stratégies. Le « Quoi transmettre » prend le dessus sur le « Comment transmettre »¹.

Interroger les théories de l'apprentissage revient à remettre en question ses propres pratiques et à, sans doute, mieux comprendre ce que l'on a l'habitude de faire en classe ; cela permet de penser des choix mieux étayés et vraisemblablement plus adaptés.

Les différents paradigmes que nous exposons sont tirés de la *tentative* de classement établi par J.C Sallaberry (2004b) dans son ouvrage : « Dynamique des représentations et construction des concepts scientifiques ». Un paradigme² est « ...Une théorie suffisamment élaborée dans sa formalisation »³ qui se repère par sa singularité se caractérisant en sciences par un mouvement reconnu, établi et institutionnalisé, qu'il soit dépassé ou dépassant⁴. Sans tomber dans un raccourci qui ferait d'un paradigme « le » courant de pensée dominant, Kuhn (1962) prétend qu'un paradigme peut être assimilé à un cadre théorique auquel adhère la communauté scientifique du moment. Ainsi, chaque progrès majeur est alors susceptible de donner naissance à un paradigme nouveau qui ne tiendra que le temps qu'un autre vienne s'imposer aux autres ou cohabiter avec les existants⁵. La longévité d'un paradigme tient autant à ce qu'il apporte à la communauté scientifique, qu'à l'intérêt que celle-ci peut avoir à le porter.

Il est possible de repérer six théories distinctes de l'apprentissage, faisant de chacune d'entre elles, des paradigmes : l'associationnisme, la théorie de la forme, la théorie opératoire, les théories de la médiation, et deux théories relatives aux sciences cognitives que sont celle du cognitivisme fort et celle du connexionnisme. De nombreuses méthodologies de l'apprentissage se réclament ou s'inspirent d'une de ses théories. Ainsi la méthodologie basée sur l'« investigation » peut-elle être, en partie, reliée à la théorie de la médiation⁶.

Au-delà des six paradigmes, nous aborderons la question des apports récents en évoquant en particulier l'*énaction* de Varela.

Classer les apprentissages est périlleux en cela que le classement aboutit à modéliser « ...la connaissance, l'intelligence, la pensée »⁷ ce qui ne manquera pas d'être source de débats.

Enfin nous concluons sur la manière dont il est envisageable d'aborder le lien penser-enseigner.

I- Les six paradigmes

I-1 L'associationnisme

Cette théorie a été entretenue par de nombreux scientifiques américains dont Skinner qui était un des leaders du behaviorisme et dont la spécialité s'organisait autour du conditionnement

¹ Approche de la formation par Morandy (97) pp 93-126 à partir de celle de Ferry (83)

² Paradeigma (παράδειγμα : modèle)

³ Sallaberry (2004b) p70

⁴ Piaget et Garcia (1983) p304 « ...en cas de dépassement d'une structure de connaissance par une autre plus large, le dépassé est intégré dans le dépassant, ce qui permet la continuité du savoir.. » ; ainsi la physique newtonienne (dépassé) est-elle intégrée dans la mécanique relativiste (dépassant).

⁵ Conception donnée par Khun Thomas (1962)

⁶ Cf. *supra* Chap III (I-2)

⁷ Sallaberry (2004b) p70

opérant⁸ chez les animaux. Ce scientifique s'est largement inspiré des travaux de Thorndike qui mit en lumière la « loi de l'effet »⁹, laquelle montre qu'un comportement suivi d'une récompense sera associé à la situation qui l'a déclenché. Ce paradigme s'intéresse au lien entre les éléments d'une situation et les réponses d'un sujet. Selon cette conception l'apprentissage est bel et bien assimilable à un processus essentiellement associatif. L'association¹⁰ s'effectue alors entre un stimulus (S) et la réponse (R) à celui-ci. Les stimuli sensoriels les plus fréquemment utilisés peuvent être visuels, auditifs (travaux de Pavlov) voire olfactifs. Sur un tel registre, de nombreuses expériences utilisant le règne animal mettent parfaitement en évidence ce lien de cause à effet, jouant sur des réponses qui touchent à la nutrition¹¹, la douleur, ou la gratification. La recherche dans ce domaine montre que la répétition S-R permet de faire baisser le temps de la réponse, témoignant ainsi de la réalité d'apprentissage du sujet. Dans une logique d'optimisation de la réponse, le sujet peut, si le stimulus varie, proposer une série de réponses hiérarchisées dont la première sera la plus couramment utilisée.

La théorie comportementale de Hull¹² peut être considérée comme plus générale. Celle-ci dissocie ce qui relève de la pulsion (motivations premières) et ce qui relève de l'habitude (apprentissage acquis qui est la répétition d'une réaction préalablement renforcée).

Sur ce registre associationniste on distinguera donc les apprentissages qui sont acquis par répétition contrainte et qui se traduisent par des réflexes conditionnels¹³, des apprentissages par essais-erreurs, qui sont aussi identifiés comme des apprentissages par la réussite et tombent sous la loi de l'effet.

En Asie du Sud-Est¹⁴, j'ai découvert un continent qui faisait la part belle au behaviorisme. La génération enseignante en place aujourd'hui (au Cambodge) est celle qui a vécu « la folie » des Khmers rouges. Cet asservissement, cette approche de la hiérarchie, s'est traduit dans les classes par un rapport (militaire) singulier maître-élève. On est bien dans une logique S-R, où le sujet apprenant répond à un stimulus ; dans le cadre de cet enseignement on peut citer quelques exemples dans la pédagogie Cambodgienne comme : le conditionnement des enfants à devoir répondre en se levant les bras le long du corps, applaudir à l'unisson une bonne réponse d'un camarade en tapant dans les mains, saluer le professeur avant de retourner à sa place. « L'espace » donné aux élèves lors des apprentissages est réduit à celui qui leur est destiné : en caricaturant, un bout de table et une chaise. Ces signes extérieurs sont le révélateur d'un apprentissage par association que constitue **le paradigme associationniste**. Si ce paradigme n'a pas bonne presse dans l'univers scolaire hexagonal c'est qu'il est le miroir inconscient d'un asservissement rejeté par les enseignants ; pour autant, force est de constater

⁸ Skinner pense que les acquisitions les plus complexes et les plus solides seront favorisées à trois conditions : seule la réponse est un témoignage d'une acquisition au sein d'un organisme – une réponse doit être sous le contrôle d'un renforcement pour persister – la complexité d'une réponse nécessite un apprentissage progressif – Richelle (1968) L'acquisition associationniste doit être adaptée à chaque sujet et conditionne la qualité de sa réponse p117

⁹ Thèse d'état 1898 dans laquelle Thorndike introduit la loi de l'effet

¹⁰ Piaget (1979) p54 avance que cette association est réversible ; c'est-à-dire que le stimulus n'est opérant que parce qu'il existe un schème de réponse acquis (S↔R) et non pas (S→R) : la réponse pilote autant le stimulus que le contraire.

¹¹ Exemple bien connu des chasseurs de palombes pour récupérer leurs « pigeons volants » ; ces derniers sont attirés dans la palombière (pour pouvoir être lâchés de nouveau) grâce à un son qui imite un grain de maïs tombant sur une petite planche : ici le stimulus est auditif et la réponse nutritive. L'acquisition a été établie au préalable par association entre un son et la céréale et renforcée durant plusieurs semaines avant la saison de chasse.

¹² Système du comportement (1952)

¹³ Delay (1975) p166

¹⁴ Dans le cadre de mes interventions avec VALOFRASE (Valorisation du Français en Asie du Sud-Est).

que certains apprentissages s'appuient sur cette approche basée sur le « par-cœur ». Les tables de multiplications, les conjonctions de coordination, l'orthographe des adverbes, les noms des éléments chimiques dans le tableau de Mendeleïev sont très souvent appris par associations. On a parfois recours à ce paradigme pour planter le décor de ce qui sera par la suite le terrain de jeu, d'apprentissages plus intéressants. C'est une donnée qui dérange parfois la communauté enseignante dans le premier degré où l'affichage des méthodologies participatives relevant d'un constructivisme est une fierté collective. Pour autant, faire l'impasse systématique de l'associationnisme à l'école pourrait se révéler être une erreur et ne pas l'utiliser à bon escient correspondrait à une position idéologique qui ne tient plus devant le principe de réalité. Que n'a-t-on pas culpabilisé les étudiants et les enseignants en prônant « l'idéal » constructivisme de manière systématique au détriment de l'associationnisme, lequel est alors utilisé par les formateurs (ou en devenir) « la boule au ventre » en ayant le sentiment d'être en manque d'imagination !

Qui se souvient avoir pris du plaisir à apprendre les tables de multiplication ? Et pourtant, nous pouvons, encore aujourd'hui, donner le résultat des produits de deux nombres quelconques compris entre 2 et 9 ! Certains diront que dans un tel cas « seul le résultat compte ».

Actuellement l'application la plus répandue se traduit chez de nombreux éditeurs par le développement de logiciels éducatifs, dès la maternelle, dont le principe est basé sur l'association.

Avec ce paradigme on recherche les liens de causalités premières afin de dégager des invariants qui déclenchent des réponses récurrentes et systématiques. En définitive on veut construire des fondations solides en faisant accepter l'idée aux sujets qu'ils réaliseront plus tard que la méthode, certes peu enjouée, est loin d'être vide de sens. Peut-on réellement faire fi du paradigme associationniste à l'école ? Sans tomber dans l'asservissement permanent, peut-on ignorer la vertu d'être parfois cognitivement contraint ?

Cette théorie de l'apprentissage est appréhendée comme ayant un rôle dans les fonctions générales de la conscience, la théorie des sentiments, faisant d'elle un instrument explicatif de toute la vie psychologique¹⁵.

Enfin les réponses aux stimuli peuvent prendre des formes très différentes et non directement observables ou encore une même réponse peut être obtenue avec des stimuli sémantiquement proches¹⁶. Tous ces travaux témoignent de l'importance de cette théorie particulièrement présente chez les anglo-saxons au début du XX^e siècle.

I-2 La théorie de la forme (gestalt¹⁷ - théorie)

Ce paradigme se distingue du précédent par le caractère soudain de la solution lors de l'apprentissage, preuve que l'hypothèse d'association ici ne peut être valide.

Les partisans de ce paradigme considèrent *problème* et *solution* comme deux structures distinctes. La résolution d'un problème réside dans le passage d'une structure (problème) à l'autre (solution) par restructuration, réorganisation sur le champ perceptif essentiellement¹⁸.

Cette théorie a été largement éprouvée dans le règne animal avec des primates par Köhler (1927) dans une série d'expériences menées à Tenerife de 1913 à 1920¹⁹. Chez les sujets humains citons cette expérience de « l'enfant et les trois boîtes »²⁰.

¹⁵ « Nous verrons en effet à propos de chaque opération psychologique l'œuvre de l'association puisque celle-ci est une fonction générale de la conscience » Rey(1919) p122

¹⁶ Reuchlin (1977) p147-148

¹⁷ Vient du verbe allemand gestalten qui signifie : « mettre en forme, donner une structure signifiante ».

¹⁸ Reuchlin (1977) p214

On donne trois boîtes à un enfant (environ 8 ans) ; celles-ci sont rouges et jaunes mais seules deux sont de la même couleur. Un bonbon est placé dans la boîte de couleur unique. L'enfant recherche le bonbon parmi les trois boîtes en l'ouvrant comme bon lui semble ce qui définit alors un essai, l'expérience en comportant un total de quatre-vingt. On étudie l'évolution du nombre d'erreurs (on attribue une erreur pour chaque ouverture de boîte ne contenant pas le bonbon) en fonction du temps (identifié par des groupes de 10 essais). On observe une prise de conscience chez l'enfant des deux règles : « Quand il y a une jaune et deux rouges c'est la jaune ; quand il y a une rouge et deux jaunes c'est la rouge » qui se traduit par une chute brutale des erreurs à partir du cinquante-deuxième essai. Les derniers essais s'effectuent sans erreur. Il y a eu brusque prise de conscience et non renforcement associatif. Tout se passe comme si l'enfant avait eu une vision soudaine (*insight*)²¹ et générale du problème à résoudre ; ce sont peut-être les fameux « Ah oui !! » ou «..mais bien sûr..» qui jalonnent nos quotidiens de formateurs au sein des multiples cohortes d'étudiants. Nous avons là un parfait exemple de la théorie **Gestalt (le paradigme de la forme)**. Ces apprentissages nécessitent de pouvoir observer, visuellement parlant, toutes les données du problème sans quoi la restructuration n'est pas potentiellement accessible au sujet.

Un tel apprentissage intuitif²² semble être réservé à l'ordre des primates et à certaines tâches simples. Néanmoins ce qui est spécifique de cette théorie ne réside pas tant dans le caractère intuitif du cheminement que dans la soudaineté de la solution qui rend compte de la restructuration.

Ce paradigme nous fait penser à deux exemples de restructuration brutale : le premier est celui des illusions d'optiques pour lesquelles deux images différentes s'entremêlent. La première image apparaît de manière immédiate quand la seconde nous n'est pas encore accessible. Chez certains sujets la seconde apparaît plus tard, voire pas du tout, ce qui pourrait signifier que la restructuration n'a pas eu lieu. Il se joue vraisemblablement sur le plan neurologique des connexions particulières pour qu'une telle émergence s'établisse. Le second est celui suscité par l'artiste Jean-Pierre Blanchard qui peint des visages en quelques minutes et dont la révélation de l'identité ne nous apparaît qu'au dernier instant. Au fur et à mesure nous associons des formes à des parties du visage sans pour autant parvenir à dégager un tout cohérent. Ce ne sont que les dernières et ultimes associations qui permettent la restructuration finale et l'identification de la personne peinte par l'artiste. La conscience de toutes les pièces du puzzle ne sous-tend pas de pouvoir en identifier le thème général. En effet le tout (l'ensemble des objets) apparaît comme ne pouvant pas être réduit à la somme des parties (objets séparés).

Cette théorie met à mal le behaviorisme empêchant de réduire la résolution de problème au seul conditionnement, car ici seules les formes qui constituent l'environnement du sujet sont contraintes. Favoriser la prise de conscience d'évènements liés entre eux chez les élèves devrait permettre de les mettre en situation de réaliser de nouvelles structures. Donner la possibilité de vivre des restructurations, c'est aussi donner le goût de la découverte et initier l'intérêt de « rechercher ».

¹⁹ Dans ce genre d'expériences les primates sont dans un lieu clos où de la nourriture inaccessible (trop haute ou enfermée) est toutefois visible – par ailleurs des objets sont à leur disposition susceptibles de les aider à atteindre la nourriture – après une série d'échecs l'animal utilise un ou plusieurs accessoires pour parvenir à ses fins et récupérer la nourriture.

²⁰ D'après de Montpelier G. (1973) p 46

²¹ Insight ne signifie pas soudain mais « perspicacité » ce qui convient tout à fait au processus expérimental et à l'état cognitif du sujet (à force de rechercher la solution émerge) - Köhler propose ce mot directement traduit du mot allemand *Einsicht* qui signifie « prise de conscience »

²² Delay (1975) p166 : § L'apprentissage avec intuition

I-3 La théorie opératoire

Piaget propose un recadrage des deux précédents paradigmes. « Il développe le concept de structure au point d'en proposer la généralisation »²³. Ce paradigme fait la part belle « ...aux opérations que le sujet fait subir aux objets »²⁴. « Ici l'intelligence est alors assimilable à des actes ». Quand un primate utilise la tige d'un végétal pour récupérer des fourmis dans une fourmilière, quand un corbeau lâche en vol une noix pour qu'elle se brise en arrivant au sol, ces différents cheminements intentionnels ont été construits au cours de tâtonnements expérimentaux directs avec les objets mis en jeu. Un objet a été détourné de sa fonction de base en devenant un outil opérationnel par l'activité même de l'individu. Le végétal, la noix, ont tous un point commun : ils ont subi des opérations²⁵. Ces opérations ont une finalité commune qui est d'apprivoiser un objet pour le rendre familier, dans une logique d'intention ultérieure. Ces tâtonnements sont des actes qui font partie de schèmes²⁶ dont la finalité est entre autres d'accroître sa performance, quitte à lui faire subir des variations fonctionnelles. Un exemple saisissant est celui de Betty²⁷ la corneille. Dans le règne animal, peu d'espèces ont su développer des compétences permettant d'utiliser des objets comme des outils. On a ici un détournement de fonction d'un objet issu d'une série de manipulations.

L'organisme s'appuie sur le concret au départ pour construire sa pensée avant de pouvoir penser des actes qu'il parvient à maîtriser. Sallaberry (2004b) propose que cet aller-retour puisse se résumer par « penser en agissant » et « agir en pensée ». Il est alors possible d'assimiler l'intelligence à « ...une conception opératoire, ou opérationnelle.. ». Les structures de l'individu évoluent pour « ...passer d'une intelligence « concrète » (sensori-motrice) à une intelligence abstraite (fondée sur les représentations), puis à une intelligence formelle (fondée sur les représentations et les opérations) » ce qui fait de ce **paradigme opératoire** un constructivisme. Piaget oppose cette théorie opératoire à la pensée formelle²⁸ qui, elle s'appuie sur des recours hypothéticodéductifs. Pour tenter de convaincre il va jusqu'à construire un parallèle osé entre les mécanismes de l'apprentissage opératoire et la phylogénétique. Ainsi, réfutant les approches de J.B.Lamarck et de R.Darwin, pour lesquels un sujet s'accommode de manière passive à son environnement pour le premier, ou évolue de manière brusque par mutation pour le second, il adhère à la position de C.H. Waddington qui prône l'hérédité de l'acquis²⁹. Dans cette dernière analogie, il existe un lien entre intelligence et adaptation particulière, car elle est ici de nature « intentionnelle », et non pas subie voire fortuite. Selon Piaget une adaptation reste à l'initiative du sujet qu'elle soit contrainte ou non par conséquent elle peut être considérée comme une action intelligente opératoire.

Un exemple dans le règne animal peut illustrer le propos de Piaget. Le schéma de Punch³⁰ représente un martin pêcheur posé sur une branche au-dessus de l'eau observant un poisson. Sans connaître la loi de l'optique géométrique de Snell, l'oiseau parvient pourtant à capturer sa proie, signe que son habileté est le fruit d'un processus d'apprentissage jalonné d'échecs et de réussites.

²³ Sallaberry (2004b) p74

²⁴ Sallaberry (2004b) p74

²⁵ Peut être considérée comme une opération toute action susceptible d'être réversible

²⁶ Séquences d'actions qui rendent compte de l'acquisition d'un objectif ; par exemple le schème d'habitation comporte une série d'actions indispensables à la construction d'un habitat. En revanche Vergnaud (1985 p66) définit un schème comme étant « l'organisation invariante de la conduite pour une classe de situations données ». Piaget (1966 p 431) définit un schème comme étant « un instrument de généralisation qui permet de dégager et d'utiliser les éléments communs à des conduites analogues successives.. ».

²⁷ Une corneille parvient à utiliser un fil de fer dont elle modifie la forme pour en faire un outil-hameçon (expériences réalisées au département de zoologie par le professeur Alex Kacelnik de l'Université d'Oxford en 2002)

²⁸ Piaget et Inhelder (1955) p220

²⁹ Piaget (1967-1970a) repris par Reuchlin (1977) p225

³⁰ Varela (1996) p43

En sciences physiques, mettre les élèves en situation de réaliser des expériences a très longtemps été perçu comme étant des moments cognitifs faibles. Par binômes, les élèves répondaient à une commande sous forme de recette de cuisine avec des attendus parfaitement prémédités et un espace de liberté opératoire plutôt restreint. Ils étaient ainsi invités à faire des opérations guidées sans véritable tâtonnement. Le paradigme opératoire, lui, est basé sur l'idée que l'élève découvre lui-même la portée de ses propres opérations et réalise ainsi sans guidage l'étendue des fonctionnalités des objets qu'il utilise.

Cela me renvoie à un vécu très personnel qui est l'utilisation de mon troubleau (filet à papillons). Au fil des années, j'ai développé des techniques de chasse par essais, échecs-réussites. La topographie du terrain, l'ensoleillement, la nature des vols, sont autant de paramètres qui m'ont indirectement fait adapter mes gestes et mes tentatives de capture. Cette connaissance acquise de manière aléatoire et circonstancielle est devenue instinctive car reconnue cognitivement comme efficace. Une connaissance acquise par une méthodologie opératoire, bien qu'elle mette du temps à se stabiliser, revêt l'avantage d'être issue d'un processus personnel qui imprègne profondément l'individu. En classe avec ses élèves, a-t-on véritablement le temps de le prendre ?

I-4 La théorie de la médiation (constructiviste-interactionniste)

Là où Piaget pense que les schèmes sont des éléments moteurs essentiels, Vygotsky fait d'*autrui* un paramètre incontournable de l'apprentissage et du développement mental. Être « seul » est pour ce dernier un facteur limitant. Piaget découvrant l'œuvre de Vygotsky après sa mort, se défendra³¹ en avançant que tout individu est marqué par son environnement faisant de lui un être socialement « accompagné » (les actes d'un sujet, fût-il seul, ayant été selon Piaget analysés au travers de son vécu social qui aura donc pu influencer ses actions). Quoi qu'il en soit, si la « présence sociale » peut faire débat entre les deux approches, la « présence physique », elle, et son influence, sont réellement absentes chez Piaget ; cela paraît peu contestable. Dans un cadre où l'on s'accorde sur l'interdépendance entre apprentissage et développement mental³² Vygotsky s'intéresse au paramètre « *autrui* ». Ce paramètre est sans influence sur le développement d'un animal à l'exception des primates car un animal n'est pas capable d'effectuer une tâche qu'il ne puisse réaliser seul³³. La présence d'une tierce personne permet (par imitation par exemple) à l'enfant d'atteindre des comportements nouveaux et plus élaborés. Si imiter ne signifie pas maîtriser et encore moins comprendre, ces comportements participent à la construction d'un développement mental plus riche. En cela avoir pu se confronter à de nouvelles limites non-accessibles sans une aide extérieure devient un réel atout. Ainsi ces échanges entre pairs ou avec un adulte favorisent la dynamique des représentations et créent une saine émulation sous la forme d'un conflit sociocognitif. Les dissonances étant mises sur la place publique, chacun doit argumenter, débattre, tenter de convaincre, pour faire évoluer la pensée de tous, ce qui témoigne de « l'importance de l'intervention des autres, et notamment des adultes, dans le développement de l'enfant »³⁴. Ces interactions sociales ont lieu « ...tout en coordonnant des centrations opposées dans une action commune »³⁵. Pour Vygotsky la pensée collective revêt une importance singulière car elle est annonciatrice de la pensée individuelle ; la pensée de la structure précède celle des

³¹ Piaget (désormais édités à la fin de - Pensée et langages - sous le titre : « Commentaires sur les remarques critiques de Vygotsky » - Rééditions : La Dispute, Paris, 1997)

³² Bronckart (1985) p95-99 « ...D'une part le processus de développement est conçu comme indépendant de celui de l'apprentissage mais d'autre part ce même apprentissage au cours duquel l'enfant acquiert toute une série de formes de comportements est considéré comme coïncidant avec le développement ».

³³ Bronckart (1985) p108 «...comme l'ont mis en évidence les expériences de Köhler que les possibilités d'imitation des animaux ne dépassent pas les limites de leur capacité intellectuelle.. »

³⁴ Sallaberry (2004b) p77

³⁵ Sallaberry (2004b) p77

individus qui la composent ; le groupe est en résumé le siège d'échanges sociaux en interactions qui façonnent chaque pensée individuelle qui s'en nourrit.

Dans un tel contexte, la surface correspondante à l'espace de développement d'un individu, croît avec les interactions sociales. Cette croissance est, selon Vygotsky, dépendante, de la qualité relationnelle dans le groupe mais également de la tension émotionnelle qui l'habite. Il définit³⁶ alors la « zone proximale de développement »³⁷, comme étant cet accroissement de surface qui représente en définitive l'apport interactionniste.

Bruner (1996), lui, va plus loin encore, en disant que la dynamique opératoire au sein du groupe est influencée par les opérations elles-mêmes ; tout se passerait comme si l'effet produit devenait à son tour, le catalyseur de nouvelles opérations. Cette saine réaction (de substitution³⁸) permet d'atteindre un état final plus riche, plus rapidement, tout en prônant une *psychologie culturelle*³⁹. Alors que la culture est aujourd'hui très peu partagée, Bruner, nous invite à réfléchir à ses mécanismes structurants. Pour une meilleure appropriation, sans que l'on ait besoin de l'imposer (comme Malraux avait pu le souhaiter) et la rendre plus accessible, l'enseignement préalable de ses codes⁴⁰ est sans doute une obligation. « Mettre l'enfant au centre des apprentissages » n'a de sens selon Bruner que si son contexte culturel l'accompagne. Ce dernier est convaincu que « ...la culture donne forme à l'esprit »⁴¹ ; il prône un apprentissage qui permette à l'individu de découvrir par lui-même, grâce à ses efforts cognitifs qui font référence à son histoire. Cette culture doit affecter les pratiques de classe dans une logique de lutte contre les grands fléaux⁴² en utilisant « une culture de l'apprentissage mutuel ». **Le paradigme de la médiation** fait la part belle à la coopération⁴³ sociale, mettant les individus face à eux-mêmes. En cela il est potentiellement « violent » car renvoyant tous les acteurs à « leur propre histoire » laquelle est parfois douloureuse. La médiation s'apprend et ce à tous les étages ; certains se sentiront agressés par les interactions qu'un tel paradigme impose quand d'autres y verront un espace naturel d'expression. Ne nous y trompons pas, susciter, encourager ce paradigme, c'est aussi faire un pari⁴⁴ sur le fonctionnement d'un groupe et du statut que l'on veut bien donner à la médiation. Nous reviendrons plus longuement⁴⁵ sur cette option pédagogique recommandée par le ministère de l'éducation nationale depuis plusieurs années, avec l'appui très insistant, de l'académie des

³⁶ Vygotsky (1933) définit la Z.P.D de la manière suivante : [...c'est la distance entre le niveau de développement actuel tel qu'on peut le déterminer à travers la façon dont l'enfant résout des problèmes seul et le niveau de développement potentiel tel qu'on peut le déterminer à travers la façon dont l'enfant résout des problèmes lorsqu'il est assisté par l'adulte ou collabore avec d'autres enfants plus avancés].

³⁷ Cette terminologie très répandue et parfois réduite à l'abréviation « ZPD » a été traduite par Deleau à partir d'un texte écrit par Bruner et Hickman (1983) dans lequel ils parlent de « zone of proximal développement » ; or leur libre traduction vient de l'expression russe « zona blizhaishego razvitiya » qui signifie « zone du développement le plus proche ». On observe un différentiel étymologique entre le superlatif (le plus proche) et l'adjectif (proximale) ce dernier ayant une connotation de moindre précision.

³⁸ Dans une réaction de substitution un des produits formés (une idée nouvelle) serait un réactif d'une autre réaction formant de nouveau un autre produit (une nouvelle idée). En cela le groupe est non seulement auto-catalytique mais aussi le théâtre de nombreuses synthèses. La pensée s'enrichit alors de manière spiralaire.

³⁹ Bruner(1996) p7

⁴⁰ Les nouveaux programmes de 2008 à l'école se tournent vers l'apprentissage de « L'histoire des arts » dont l'approche par « clefs » doit permettre aux enfants d'appréhender une œuvre de manière dynamique sans que celle-ci les renvoie à leur appartenance sociale.

⁴¹ Bruner(1996) p7

⁴² Bruner évoque la misère, la discrimination et l'aliénation comme des fléaux à combattre et défend la vertu de l'apprentissage de groupe (1996) p11

⁴³ Sensevy (2011) propose un paradigme assez proche dit « de l'action conjointe » sur lequel nous reviendrons plus précisément dans le chapitre sur les représentations (cf. *infra* Chap III (I-4-4))

⁴⁴ Reuchlin (1977) p221-222 évoque les difficultés à répondre à la question « La résolution d'un problème est-elle rendue plus facile par un travail collectif ? »

⁴⁵ Cf. *supra* Chap III (I-2)

sciences. On peut de manière objective noter que Bruner, a, par les deux liens très forts qu'il porte (culture-apprentissage et mutualisation-performances intellectuelles), tracé les principaux contours pédagogiques de l'actuelle I.B.S.E⁴⁶.

I-5 Le paradigme cognitiviste (fort)

« Un outil peut-il être doté d'une intelligence comparable à celle de son concepteur ? ».

L'épistémologie *expérimentale* est née de l'envie de créer une *science de l'esprit*⁴⁷.

Ce « fantasme » peut se traduire par la recherche de la construction d'une machine déductive assimilable au cerveau. C'est la loi des synapses, « le tout ou rien » des influx nerveux qui permettent des parallèles entre les *logiques* physiologiques, électriques, et les effets de seuil.

Cette comparaison est possible, mais peut-on se risquer à parler d'assimilation ? Les adeptes de ce paradigme franchissent le pas. On se situe alors devant *un modèle mécanique de la pensée*⁴⁸ où l'on parvient à incarner *la logique*. « Cette logique de modélisation (penser revient à computer des représentations) »⁴⁹ qui débouche sur des systèmes comparatifs entre « cerveau-ordinateur, ou pensée-traitement de l'information »⁵⁰ et sur laquelle surfe mais butte (encore) l'intelligence artificielle, est une imitation.

En effet dans la sphère scientifique, contrairement au sens courant (« Est modèle ce que l'on imite ou ce qui mérite d'être imité »⁵¹), le modèle est une copie de l'original (donc imparfaite). Si la modélisation entre certains systèmes matériels comme pour les systèmes nerveux est de type logique, il est alors très tentant de considérer les premiers comme, « incarnant la logique, cette forme supérieure de la pensée »⁵². À « la métaphore de l'ordinateur... »⁵³, les cognitivistes répondent par les percées de plus en plus spectaculaires de l'I.A.⁵⁴. La cybernétique est perçue comme source de progrès pour tout ce qu'elle apporte au génie, à la biologie aux sciences sociales, à l'économie. Notre environnement, notre quotidien sont envahis par des outils « intelligents » qui peuvent se réclamer de McCulloch et Pitts (1943)⁵⁵ sans pouvoir tendre vers cette arlésienne ou eldorado qui est de pouvoir « égaler » le cerveau. **Le paradigme cognitiviste (fort)** via l'I.A joue sur des représentations limitées par des principes inhérents à la logique formelle. On a beau anticiper les combinaisons, construire des interactions fonctionnelles, ce monde reste encore aujourd'hui asymptotique d'un « idéal » et peut apparaître pour certains comme « un leurre » tout en ayant des intérêts concrets économiques et sociaux évidents.

Tout se passerait comme si l'on était dans un état d'obéissance centralisée où les actions seraient programmées, répertoriées, symbolisées et dirigées vers un « juge de paix » qui seul serait en état de définir la motricité. L'hypothèse cognitiviste du M.I.T (Massachusetts Institute of Technology) apparaît comme étant le résultat du traitement de symboles à partir de règles prédéfinies en s'affranchissant allègrement de leur sens ; dans un tel contexte percevoir ce qui n'est pas programmé à l'avance paraît très compromis. Peut-on réellement

⁴⁶ Inquiry-Based Science Education (soit, l'éducation scientifique fondée sur l'investigation) – cette abréviation est utilisée dans le rapport ROCARD commandé par la commission européenne et présenté le 23-06-2007 ; ce rapport intitulé « L'enseignement scientifique aujourd'hui : une pédagogie renouvelée pour l'Europe » fait des recommandations sur la manière d'aborder l'enseignement scientifique en Europe.

⁴⁷ Varela (1996) p29

⁴⁸ Varela (1996) p39

⁴⁹ Sallaberry (2004b) p78-79

⁵⁰ Sallaberry (2004b) p78-79

⁵¹ Dupuy (1994) pp17-18

⁵² Sallaberry (2004b) p78-79

⁵³ Dupuy (1994) p21

⁵⁴ Intelligence artificielle

⁵⁵ Neurologues américains ayant proposé les premiers le modèle computationnel de neurone artificiel en 1943

avancer que nous pouvons être réduits « à un paquet de neurones »⁵⁶ ? Peut-on considérer que notre cerveau interagit avec la seule forme des symboles en faisant abstraction de leur sens ?

Si l'on peut comparer deux systèmes qui exécutent des tâches similaires (ordinateur et cerveau) cela ne signifie pas pour autant qu'ils soient identiques. « Comparer n'est pas identifier »⁵⁷. Dans un tel cadre, la cognition est « le traitement de l'information : la manipulation de symboles à partir de règles⁵⁸ ». Dupuy⁵⁹ utilise, pour résumer, l'esprit des sciences cognitives au sens *hardware* : « connaître, c'est simuler ». Ce qu'il reproche fondamentalement aux cognitivistes c'est d'avoir confondu, « simuler » et « dissimuler ».

Il y a, d'un côté, ce que l'on veut faire acquérir à un élève, les compétences à évaluer, et par ricochet un cahier des charges dédiés aux fonctionnaires de l'éducation nationale, et il y a, de l'autre, les individus qui sont uniques et insensibles à la logique implacable des microprocesseurs et qui mènent la vie dure aux innombrables réformes. Si la simulation de vol est un outil devenu indispensable pour les pilotes, ils n'en restent pas moins faillibles. L'Homme demeure imprévisible et rien ne vaut la confrontation au réel qui l'est souvent tout autant que lui.

Vouloir uniformiser, robotiser un groupe, c'est considérer chaque individu comme un être asocial et transparent ; c'est considérer les réponses attendues comme acquises et l'anticipation des faits et gestes comme étant programmable ; c'est surtout oublier le petit grain de sable qui fait du vivant un organisme particulièrement désobéissant.

Si anticiper ne veut pas dire contraindre, alors il existe un espace d'expression susceptible de compenser ce qui n'aurait pas dû avoir lieu ; la cybernétique repousse toujours plus loin l'intelligence de sa programmation par imitation de la nôtre. De très nombreux logiciels éducatifs sont conçus comme de véritables arbres de choix à branches tentaculaires donnant le sentiment d'avoir « tout » prévu (ces derniers sont parfois utilisés en classe en atelier dits « autonomes »). Chaque avancée, chaque amélioration, chaque percée en ce domaine, est la preuve s'il en est, de la supériorité du concepteur⁶⁰ devant celui censé l'incarner.

Toutefois il ne saurait être question de rejeter en bloc par principe idéologique cette théorie portée par certains « orthodoxes »⁶¹ ; en effet, il faut reconnaître qu'elle apporte une aide précieuse pour les enfants médicalement assistés, en attente de pouvoir être rescolarisés. Enfin, certains moins *cybernétiques* dans l'âme mais tout aussi cognitivistes par ailleurs, comme Fodor ou encore Chomsky⁶² font la promotion d'une acquisition innée avançant qu'un changement de stade⁶³ ne peut pas être dû à un processus d'apprentissage. Ce à quoi Piaget rétorque en admettant l'existence d'un « noyau fixe »⁶⁴ tout en défendant l'idée que ce dernier soit le fruit d'une réelle acquisition, qu'il n'existe pas de « noyau fixe inné ».

I-6 Le paradigme connexionniste

Quand le paradigme cognitiviste fait la part belle aux neurones, celui-ci se focalise entre autres sur leurs connexions (si deux neurones sont activés simultanément leur lien est

⁵⁶ F.Crick (1994) et in Varela (1996) pVIII

⁵⁷ Sallaberry (2004b) p80

⁵⁸ Varela(1989) p42

⁵⁹ Dupuy (1995) p31

⁶⁰ Prochiantz (1995) p72 « Chaque machine est une invention, elle postule un constructeur... »

⁶¹ Varela(1989) p14

⁶² Ces derniers prônent une théorie de l'innéisme ou du nativisme en parfaite rupture avec la théorie constructiviste du groupe de Genève (1979) p239 (commentaire de Massimo.Piatelli-Palmarini)

⁶³ On parlera de changement de stade quand un sujet acquiert effectivement des structures cognitives plus riches.

⁶⁴ Contrairement à Chomsky, Piaget n'accepte pas l'idée selon laquelle une connaissance (un « noyau fixe inné») puisse être héréditaire.

renforcé⁶⁵) ce qui a donné le nom de *connexionnisme*⁶⁶. Que les neurones soient naturels ou artificiels, leurs réactions «sont extrêmement sensibles au contexte»⁶⁷ et leur degré d'activation varient avec l'apprentissage. À partir d'un certain niveau de complexité, il existe une coopération générale émergente qui peut se passer d'un «dictateur» souverain. Notre système n'est plus centralisé mais distribué. Les émergences sont globalement réparties dans notre cortex témoignant d'une activation non-réductible à quelques neurones. Ce paradigme s'oppose au précédent considérant que «le cerveau traite l'information venue du monde extérieur»⁶⁸. Cette interactivité intérieure-extérieure, est à rapprocher des émergences d'états globaux⁶⁹ qui rentrent en résonance, dont la conscience, le langage et la pensée, sont quelques exemples. En situation d'enseignement, le prévisible n'est pas toujours le *négatif* du réalisé. La conception d'une séance d'apprentissage, si elle anticipe les principales difficultés et tente de prédire le futur, est assujettie à une arborescence de cheminements très complexes. On touche alors à la tentation de l'associationnisme qui, lui, balise les contours d'une autoroute rassurante. Sur le plan pédagogique, *l'adaptation*, est une donnée intimement liée au connexionnisme.

S'adapter, signifie se préparer à devenir interprétatif, imaginatif voire intuitif. Être à l'intérieur de son groupe, tout en étant à l'extérieur dans une position de spectateur afin d'interpréter les événements pour observer les éventuelles incohérences avec ce que l'on a souhaité – faire preuve d'imagination pour pouvoir rebondir – être capable d'improviser et avoir de l'intuition pour remettre son monde sur les rails et rétablir une situation compromise, tel est le défi du **paradigme connexionniste** qui s'affiche comme le courant «en devenir» des sciences cognitives.

En observant le ciel dans le proche environnement de Jupiter avec «sa»⁷⁰ lunette, Galilée⁷¹ pense observer une série d'étoiles ; puis petit à petit voyant qu'elles jouent à cache-cache avec la planète, celui-ci construit l'hypothèse que les objets qu'il décrit et dont il note les positions successives sont des satellites de Jupiter. Il y a ici tous les attributs d'un exemple historique saisissant relevant du connexionnisme. En relisant les écrits de Galilée et avec le recul épistémologique actuel⁷², on peut se demander pourquoi il n'a pas réussi à émettre son hypothèse «plus tôt» ?

On touche là, me semble-t-il à la singularité de ce paradigme : la dynamique des réseaux, l'harmonie du système, qui permet «le dé clic» chez Galilée le 15 janvier (1610 !!).

*[..selon toute vraisemblance, ce n'est que le 15 janvier que naît l'idée qu'il puisse s'agir de satellites de Jupiter. C'est ce jour-là, en effet, que Galilée transcrit ses notes antérieures sur une feuille blanche et commence un véritable journal de ses observations. En outre, les notes qui, jusqu'au 15, étaient rédigées en italien, le sont en latin à partir de cette date : indication très claire que Galilée envisage dès maintenant de s'adresser à tous les astronomes d'Europe, pour leur faire part d'une découverte importante]*⁷³.

Si le point de départ cognitif de cette histoire est de type associationniste (comportements «anormaux» des objets dans le ciel qui amène des interrogations) Galilée est le siège d'une émergence globale qui génère une restructuration complète de son point de vue. Cette prise de

⁶⁵ Donald Hebb (1949) p63, p70 et in Varela (1996) p57 «l'apprentissage est basé sur les modifications du cerveau émanant du degré d'activité corrélée entre les neurones»

⁶⁶ Terme proposé par J.Feldman – D.Ballard (1982) p205-254

⁶⁷ Varela (1996) p71 – (cf. *infra* Chap III (I-1) Edelman et le paradigme du « geste »)

⁶⁸ Varela (1996) p44

⁶⁹ Cf. *supra* Chap III (I-1)

⁷⁰ Couzier (2002) La première lunette semblerait avoir été découverte de manière fortuite p116

⁷¹ Galileo Galilei : « Le messager des étoiles »

⁷² Se rapporter aux travaux de J.E. Arlot de l'I.M.C.E in L'astronomie (1986)

⁷³ Galileo Galilei (1610) p72

conscience est alors concrètement extériorisée par son choix délibéré d'écrire dès lors en latin ; cet événement donnera ses lettres de noblesse à l'héliocentrisme⁷⁴.

Je voudrais ici revenir⁷⁵ sur une petite aventure entomologiste très personnelle, mais qui illustre à son niveau me semble-t-il, le courant connexionniste, tout en ouvrant des liens étroits entre les processus d'acquisition et « la mémoire ».

Après de longues années passées à capturer des rhopalocères⁷⁶ tout azimut dans ma jeunesse, et à les observer « jouer » avec leurs ailes, j'ai repris la clef des champs pour les étudier⁷⁷ avec mon œil d'adulte. S'agissant des jeux d'ailes (ceux que je pouvais observer de nouveau), ils étaient conformes à mes souvenirs, ce qui me permit sans doute de les reconnaître. On notera que notre histoire relève de la mémoire (« le passé est non seulement reproduit mais reconnu ») et non pas de l'habitude (phénomène de persistance). (Delay, 1975, p185). Toute cette connaissance longuement accumulée au cours de ces nombreuses années était en attente comme prête à surgir. La connaissance des phénomènes physiques liés à la lumière (réflexion-diffusion-diffraction..), des attitudes morphologiques que je connaissais, aurait pu (dû) me permettre de formuler l'hypothèse de leur corrélation. Celle-ci pourtant évidente à formuler avec du recul, ne m'est pas apparue tout de suite. Et pourtant (comme pour Galilée) tout était « là », bien en place, attendant sagement que l'idée émerge enfin telle un « insight » interne. Nous voyons dans cette hypothèse formulée et par la suite éprouvée⁷⁸ que sont les actes thermorégulateurs chez ces insectes, l'incarnation d'une activation neurologique globale qui permet de libérer la prise de conscience. Cette libération pourrait se traduire par un réarrangement brutal de quelques connexions donnant naissance à un tout devenu cohérent. S'il paraît délicat de hiérarchiser l'importance des trois mémoires⁷⁹ dans un tel processus, il est en revanche possible d'avancer qu'elles peuvent participer à cette activité neurologique singulière.

Cette théorie de l'apprentissage se présente donc comme un défi pour tout pédagogue qui souhaite faire penser ses élèves à partir de l'émergence de formes. Si la pensée donne forme aux formes, les formes ne sont-elles pas sources de pensées⁸⁰ ?

Nous allons maintenant aborder ce qui relève des apports récents sur l'apprentissage à savoir, discuter de l'énaction proposée par Varela et du niveau « subsymbolique » de Smolensky.

Si l'Homme est neuronal alors Changeux s'intéresse au *hard disk*, Bruner lui nous éclaire sur le *soft disk*, quand Varela et Smolensky eux sont sur le *process*.

II- La question des apports récents

L'approche énaïve de Varela nous invite à réfléchir non seulement sur le modèle (les symboles du cognitivisme fort) qui pourrait être le plus approprié, mais aussi sur les manières dont les élèves l'appréhendent (les attributs du connexionnisme).

Varela va jusqu'à énoncer qu'il est peut être vain de croire qu'il puisse exister une dissociation entre le fonctionnement interne d'un individu et l'appréhension de son

⁷⁴ Copernic (1543) Théorie qui positionne le Soleil au centre du système solaire Copernic (1543)

⁷⁵ Cf. *supra* Chap I (I-1)

⁷⁶ Tolman T. & Lewington R. (1999) Ordre des papillons de jour - Lecointre (2001) un ordre est défini sur un plan phylogénétique

⁷⁷ Lhonoré J. (1986). Université du Mans / Dans le cadre d'un travail de protection et de suivi en lien avec le Cemagref et Espace Nature d'Aquitaine

⁷⁸ Berthier (2000) et (2003). On pourra utilement consulter ces travaux remarquables

⁷⁹ Delay (1975) présente la fonction mnésique sous une forme hiérarchisée de trois mémoires : sociale (qui relève de la conduite du récit) autistique (qui relève du rêve et touche à l'affectif et aux émotions) et sensori-motrice (qui relève des sensations et des mouvements). p186-187

⁸⁰ Prochiantz (1995) pp26-27

environnement. Les expérimentations sur la vision sont de nature à renforcer cette idée. En effet, « le monde que l'on voit » n'est pas toujours conforme à « celui qui est devant nous ». Le monde tel que nous le percevons serait dépendant de celui qui le perçoit. La perception est un processus actif qui implique une interaction forte entre l'observé et l'observant⁸¹.

Varela modélise la cognition avec l'énaction. Sa sensibilité de biologiste l'invite à proposer un modèle où sujet et monde émergent de concert (le biologique ne précède pas le cognitif comme le suggère Piaget). L'émergence du monde est par conséquent à la fois consécutive et simultanée de celle du sujet. La conception de la cognition est liée à celle du vivant. Ainsi il définit les systèmes *autopoïétiques* comme des machines qui «..transforment la matière en eux-mêmes de façon que leur organisation soit le produit de leur opération »⁸².

Enfin, Varela donne une ébauche de sa doctrine sous la forme de trois questions-réponses.

« *Question 1* : Qu'est-ce-que la cognition ?

Réponse : L'action productive : l'historique du couplage structurel qui énonce (faire-émerger) un monde.

Question 2 : Comment cela fonctionne-t-il ?

Réponse : Par l'entremise d'un réseau d'éléments inter-connectés, capable de subir des changements structuraux au cours d'un historique non interrompu.

Question 3 : Comment savoir qu'un système cognitif fonctionne de manière appropriée ?

Réponse : Quand il s'adjoint à un monde de signification préexistant, en continu développement (comme c'est le cas des petits de toutes les espèces), ou qu'il en forme un nouveau (comme cela arrive dans l'histoire de l'évolution).»⁸³

Deux nouvelles notions voient le jour ici.

1) Exit, la représentation au sens fort (le symbole) – *l'intelligence* est définie en fonction de l'aptitude à pénétrer un monde partagé.

2) Réaliser une tâche se justifie désormais non plus par une structure fonctionnelle mais par *l'évolution*.

S'agissant du paradigme connexionnisme, Smolensky⁸⁴ le qualifie de « subsymbolique » ou « subconceptuel » tout en l'opposant au paradigme cognitiviste « symbolique » ou « conceptuel ». Le connexionnisme est le paradigme des réseaux neuronaux.

Quel(s) lien(s) de parenté peut-on avancer entre cognitivisme et connexionnisme ? Memmi⁸⁵ fait quatre propositions : *la ségrégation*, *la compilation*, *l'hybridation* et *l'inclusion*. La première renvoie dos à dos les deux paradigmes. La seconde relègue l'approche en réseau au second rang. La troisième se propose de conduire une conciliation. La quatrième fait la part belle aux réseaux ; le cognitivisme serait alors à la gravitation newtonienne ce que le connexionnisme serait à la relativité restreinte. Le réseau a « phagocyté »⁸⁶ le symbole. Le caractère dynamique du connexionnisme qui fait tendre le système vers un état de *maxima harmonie*⁸⁷ semble prendre le pas sur le cognitivisme.

Varela quant à lui va au-delà de *l'inclusion* de Memmi. Dans une carte polaire⁸⁸, il positionne, le cognitivisme au centre puis de manière concentrique et, l'englobant successivement, place l'émergence (le connexionnisme) puis l'énaction.

⁸¹ Des expériences sur l'olfaction témoignent également du lien intime liant l'individu à son historique, l'odeur activant certaines régions du cerveau uniquement pour un état éveillé du sujet.

⁸² Varela (1989) p48

⁸³ Varela (1996) p112

⁸⁴ Smolensky (1992) pp81-110 in D.Andler

⁸⁵ Memmi (1990)

⁸⁶ Ici la cellule se contente d'en absorber une autre sans la détruire

⁸⁷ Smolensky (1992) p104

⁸⁸ Varela (1996) p121

Voici ce qu'il nous faudrait retenir de l'énaction : « Bref, de même que le connexionnisme est issu du cognitivisme et d'une plus grande proximité avec le cerveau, l'approche de l'énaction fait un pas de plus dans la même direction pour englober aussi la temporalité de la vie, qu'il s'agisse d'une espèce (évolution), d'un individu (ontogénèse) ou d'une structure sociale (culture).»⁸⁹ Si l'énaction devait être promue au rang de paradigme, alors pour celui-ci, penser serait faire co-émerger sujet et monde ou encore, percevoir dans l'action. L'énaction est séduisante sous bien des aspects. Il demeure cependant dans cette doctrine une dimension peu valorisée, bien que présente : celle de la *représentation*, au détriment de la dualité action-perception.

Il est temps désormais d'essayer de réinvestir nos propos afin d'éclairer la pensée, aux regards des différents paradigmes.

III- Enseigner : faire un choix de paradigme

Sur le terrain de l'apprentissage, devant une telle diversité cognitive des individus (devant des histoires personnelles si différentes) il paraît raisonnable de dire qu'un pédagogue plutôt que de se focaliser sur un paradigme en particulier, par conviction, par habitude, pourrait au préalable être invité à s'interroger, sur la manière dont un élève « apprendra le plus efficacement possible », dans un contexte culturel donné.

Paradigmes		Apprentissages
Associationniste	« Penser, c'estassocier (des objets) ».
Structuraliste		...reconnaître une forme ».
Opératoire		..agir sur les objets.
Constructiviste-interactionniste		...agir sur les objets, mais dans un contexte relationnel et social ».
Cognitivist fort		...calculer ⁹⁰ des représentations ».
Connexionniste		...faire émerger des formes ».

Ci-dessus, est présenté sous forme d'un tableau un résumé⁹¹ des différents paradigmes, associationniste – structuraliste – opératoire – constructiviste-interactionniste – cognitiviste fort – connexionniste (dont les deux derniers relèvent du domaine des sciences cognitives) et de leur implication sur l'apprentissage. « Penser », prend alors, selon le paradigme, des considérations diverses voire difficilement conciliables comme pour les deux derniers. Quand on est un adepte du « french flair »⁹² ce grain de folie du XV de France vous fait lever de votre chaise. À cet instant, l'imprévisible devient maître du jeu, une forme nouvelle émerge créant un mouvement qui sort de nulle part, une forme nouvelle inconnue de tous et de ceux qui la construisent, tout devient possible, fluide comme autant d'évidences sans avoir été pensé à l'avance computed et répété. Percevoir l'autre, son, ses partenaires, tout en agissant, est ce qui caractérise ces envolées légendaires commentées par un duo⁹³ célèbre. Bouthier (2008) y voit des exemples de l'énaction.

Dans cette idée selon laquelle des formes nouvelles naissent dans l'action, Sensevy (2011), dans sa proposition de paradigme de l'action conjointe nous signifie que c'est « la sémiose d'autrui qui énonce l'ajustement mutuel »⁹⁴ : ce qui pourrait dans une certaine mesure se traduire sur un rectangle vert par : « sentir le jeu » ou « avoir le sens du jeu ».

⁸⁹ Varela (1996) p113

⁹⁰ Dupuy (1994) p22 « Connaître, c'est effectuer, sur des représentations, des manipulations réglées » et p16 « Penser, c'est calculer » (qui vient de la traduction *Thinking is reckoning*).

⁹¹ A partir de celui de J.C Sallaberry (2004) p81-82

⁹² Formule utilisée par les britanniques pour qualifier les actions françaises (lors du tournoi des 5 devenues 6 nations au rugby) qui « déroutent » car sortant de tout schéma tactique classique.

⁹³ Roger Couderc et Pierre Albaladejo

⁹⁴ Sensevy (2011) p55

Être convaincu par un paradigme ne signifie pas pour autant abandonner les autres. S'intéresser aux autres ne signifie pas non plus renier ses convictions. Ne peut-on pas dès lors avancer l'idée selon laquelle : « **Enseigner, c'est rechercher à valoriser chaque paradigme pour en tirer le meilleur** ».

Transition vers le concept de représentation

La compatibilité entre une théorie d'apprentissage et l'histoire d'un sujet influence vraisemblablement la réussite d'une situation d'apprentissage. On ne perçoit pas tous le même modèle de la même manière. Il y a ici les prémices de l'idée du *continuel développement*⁹⁵ qui nous interpelle avec force et nous invite à construire de l'adaptation.

Ceci est une réelle difficulté en formation que j'ai pu rencontrer, lorsque l'on se trouve face à un public étranger, dont on n'a pas suffisamment pris en compte l'Histoire. Cette dernière est un facteur significatif de divergence dans l'appréhension d'une situation donnée ; il s'avère important de la prendre en compte. J'entends par « appréhension » une *représentation* de l'autorité, incompatible avec tout constructivisme. Si l'enseignement en Asie du Sud-Est ne laisse que peu de place aux élèves pour s'exprimer, cela vient en grande partie de la manière dont l'autorité du maître est considérée là-bas ; sans aller jusqu'à dire qu'elle s'apparente à celle de notre pays il y a quelques décennies, elle y ressemble beaucoup. Dans ces pays, la représentation est sociale, collective et particulièrement ancrée pour toute une génération.

On peut se demander ce que devient la représentation dans le cadre d'un constructivisme par médiation, cette dernière semblant se substituer à la première.

On peut également se demander dans une logique cognitiviste quelle est la place de la représentation dans la mesure où cette dernière semble prédéfinie pour ne pas dire « verrouillée » dès le départ. Par ailleurs, entre ce qu'il m'est donné à voir de mes propres yeux, et ce qui se trame dans ma psyché, il existe vraisemblablement un espace dans lequel se construisent des représentations.

En outre, si l'on part de l'idée qu'un connexionnisme s'appuie sur un état global activé, une distribution, il paraît raisonnable d'avancer que chaque état relève d'une représentation neurologique. En somme, pour toute situation d'apprentissage et ce quel que soit le paradigme dont elle relève, le sujet qui apprend est invité à construire des représentations. Parce qu'elles participent de manière incontournable aux processus d'apprentissages, nous allons désormais tenter d'aborder la question de la représentation, tant sur le plan conceptuel, que sur le plan catégoriel. Ce travail sera, par ailleurs, l'occasion de revenir sur les différentes théories de l'apprentissage, et de préciser la place de la représentation dans chacune d'entre elles.

Nous ne manquerons pas non plus de discuter de l'apport du *vivant* à la représentation, comme organisation individuelle-collective, à partir entre autres de l'apport de Varela sur la *clôture opérationnelle*.

⁹⁵ Varela (1996) p112

Chapitre III Points de vue sur les « représentations »

Synthèse du chapitre

La représentation est un objet complexe qui se modélise. Elle est une inférence car construite par un sujet cognitivement « distribué ».

« Une représentation est ce qu'échangent deux instances qui interagissent ; leur interaction se réalise par la construction, la modification, la circulation des représentations ».

La représentation est fonctionnelle, elle conditionne l'habileté motrice en situation.

La représentation est l'outil commun de toute recherche didactique.

Vouloir définir le mot « représentations » permet immédiatement de prendre la mesure de l'éventail des points de vues (des *représentations*) que nous avons de lui. Cette difficulté immédiate à transcrire avec des mots simples ce qui nous apparaît l'approcher le mieux, est un témoignage de son appartenance au domaine des concepts¹. Nous allons tenter de l'éclairer.

Si pour Le Ny² il n'y a pas de doute : la représentation *existe*, cette évidence semble moins établie dans le domaine de la psychologie. En effet la représentation n'est qu'une conséquence des actes d'un sujet la reléguant au second plan et la conditionnant à une action. Le Ny poursuit en opposant représentations *artificielles* à représentations *naturelles*. Si je sais que ces mots retranscrits ici, nourrissent mon propos (artifice), je suis démuné quant à tenir l'image mentale (naturelle) que vous vous en faites. Pour un psychologue on peut comprendre que l'approche neurologique puisse revêtir le « noble » statut, devant tout le reste.

Pour Ladrière³ dans le contexte de la théorie de la connaissance, le concept de représentation « ...repose sur une double métaphore, celle de la représentation théâtrale et celle de la représentation diplomatique »⁴ : la première s'impose par la mise en présence de l'acteur jouant son rôle et que j'observe, quand la seconde m'est suggérée par ses faits et gestes.

Il existe une grande diversité d'approches conceptuelles de la représentation. Poser la question du concept revient à tenter d'identifier ce qui différencie ses approches ou ce qui peut les rassembler. Nous proposerons sans qu'elle apparaisse comme une synthèse artificielle, une tentative de conciliation, et ce, bien que l'affaire s'annonce particulièrement délicate.

Nous allons donc interroger le concept de représentation à partir des deux *figures* de représentations que sont celle de l'*absence* défendue par Lefebvre, et celle du *geste* soutenue par Edelman. Après nous être concentrés plus particulièrement sur les 4 axes identifiés par Sallaberry qui permettent de désacraliser et de rendre plus lisible ce concept, nous ferons un détour incontournable vers ce que nous disent les sciences cognitives. Puis, nous reviendrons sur les différents paradigmes de l'apprentissage afin de rendre compte de la place de la représentation au sein de chacun d'entre eux. Enfin, nous conclurons sur les tentatives de classement de la représentation suggérées par Weil Barais, Bruner, et la proposition de Sallaberry qui s'inscrit dans un souci de rapprochement de la cognition (les sciences cognitives) et des autres domaines des sciences sociales et humaines.

I- La question du concept de *représentation*

Si la représentation (re-présentation) est si singulièrement complexe, cela vient du fait qu'elle est à la fois construite dans l'instant, tout en s'appuyant sur des dimensions passées et ou à venir. S'agissant du passé, cela nécessite de devoir faire l'effort de re-mémorisation avec toutes les approximations que cela suppose ; quant à l'avenir, il est le fruit d'un imaginaire dont les contours sont toujours accompagnés d'une zone de flou.

Le présent, le passé et l'avenir sont en éternelle confrontation lors de la construction d'une représentation. Si la représentation est un écho⁵, elle est alors affaiblie et ne peut être considérée avec certitude comme un objet fidèle à la pensée. La complexité de l'élaboration d'une représentation relativise les conclusions que l'on peut faire de sa lecture.

¹ Cf *supra* Chap IV qui traite des concepts

² Le Ny (1985) p231-238

³ Ladrière – Foessel – Gingras - in Encyclopédie Universalis (à propos de Représentation et connaissance)

⁴ Encyclopédie Universalis p 4/16 du thème « Connaissance »

⁵ Heidegger in Lefebvre (1980) p17

I-1 Les deux figures, de « l'absence-présence » et du « geste »

La figure de « l'absence-présence » chez Lefebvre

Pour Lefebvre⁶, une approche sémantique de la représentation l'invite à en donner six sens distincts :

- *scientifique* : dans la mesure où un ensemble de points (une courbe) représente un phénomène comme par exemple, l'évolution de la température en fonction de l'altitude.
- *politique* : en cela qu'un élu (local ou national) est mandaté et légitimé pour représenter l'ensemble de ses administrés.
- *mondaine* : dans le cas d'un évènement (une cérémonie, un dîner...) pour lequel il est demandé à un sujet de représenter une tierce personne voire une institution.
- *commerciale* : quand il est demandé à un représentant de vendre ou de faire la promotion des produits de son entreprise.
- *esthétique* : pour tout ce qui a trait au domaine des arts : un tableau, un clown, une pièce de théâtre peuvent représenter un paysage, donner des représentations, représenter une scène historique.
- *philosophique* : qui pourrait donner la clé des autres car la plus large et la plus importante sans pour autant parvenir à se définir avec clarté.

Pour Lefebvre (1980), « la représentation est une étape, un niveau, un moment de la connaissance »⁷. Nos pensées doivent, après avoir été débattues, s'extérioriser, pour tomber dans le domaine de la représentation. Ce débat se joue à une interface entre l' « absence » et la « présence ». La première demande un effort de contextualisation puisque l'objet matériel n'est pas accessible concrètement ; la seconde m'imprègne et m'envahit à l'issue d'une rencontre relevant aussi d'un effort : « La présence n'advient qu'au prix d'un effort, qui précède la surprise... »⁸.

La présence convoque l'absence en cela qu'elle prend le relais dès que la rencontre est terminée. L'absence, elle, convoque la présence pour pouvoir l'extérioriser.

Il y a dans cette approche de la représentation une forte activité émotionnelle sous-jacente.

Si les exemples proposés par Bailly (1997)⁹, et Frontisi-Ducroux (1995)¹⁰ permettent de comprendre comment absence et présence sont intimement liées, le pays de l'Homme¹¹ est le siège d'un exemple tout aussi saisissant. Je veux parler de l'art pariétal et plus précisément des peintures rupestres et gravures qui jalonnent les grottes de Lascaux, de Font de Gaume ou de Rouffignac¹². Si de nombreuses hypothèses servent les discours des guides qui vous accompagnent dans ces différents sites de notre Histoire, nous retenons celle qui consiste à

⁶ Lefebvre (1980) p14

⁷ Lefebvre (1980) p18

⁸ Lefebvre (1980) p226

⁹ Bailly (1997) retrace dans son ouvrage « L'apostrophe muette », l'histoire de la fille du potier de Corinthe, qui trace le contour du profil de son fiancé, à partir de son ombre portée sur le mur, la nuit qui précède son départ pour la guerre. La présence du fiancé (dessin) préfigure de son absence future ; la représentation (le contour) jouant le rôle de l'interface entre présence et absence.

¹⁰ Frontisi-Ducroux (1995) p73-74 a analysé longuement le stratagème utilisé par Persée pour vaincre Gorgô (dont la seule vue entraîne la mort certaine) ; Athéna aide Persée en lui donnant l'idée de « voir » Gorgô en utilisant son reflet dans son bouclier ce qui lui permet de le tuer. La représentation (le reflet) joue le rôle de l'interface entre présence et absence en simulant la présence de ce qui est absent.

¹¹ C'est ainsi que l'on baptise le département de la Dordogne

¹² Ces trois sites sont emblématiques, le premier étant mondialement connu et fait l'objet d'un suivi permanent, le second est le dernier site ouvert au public en Europe où il est encore possible d'observer de réelles peintures, le troisième par la qualité des gravures est à (re)découvrir...en petit train.

avancer que ces représentations prennent leur motivation dans le souci de vouloir retranscrire une absence (lors des longues périodes hivernales, durant lesquelles la faim se faisait plus particulièrement sentir): celle des animaux peints par ces artistes de l'époque. Si la présence des animaux dans la grotte au moment de l'élaboration de la représentation est « peu probable », il n'en reste pas moins que l'artiste utilise le relief de la paroi, ses aspérités, ses nuances, pour donner corps (vie) à ses représentations.

Cette corrélation absence-présence de la représentation n'est en définitive paradoxale que dans son apparence.

La figure «du geste» chez Edelman

Edelman (1992), nous donne une explication neuronale ancrée dans les sciences cognitives de la représentation. Afin de mieux saisir son propos et sans prétendre l'éclairer, attardons-nous quelques instants sur des considérations d'ordres morphologiques.

Notre cerveau est constitué de plusieurs structures parmi lesquelles : les ganglions de la base, le cervelet et l'hippocampe, ces dernières entretenant d'étroites relations avec le cortex cérébral. Au sein du cortex existent des groupes neuronaux (neurons interconnectés de manière *intrinsèques*) lesquels sont liés les uns aux autres (connexions *extrinsèques*)¹³.

Dans le cerveau, le groupe neuronal (ou « carte ») définit l'unité de sélection.

Ainsi Edelman avance une théorie de la sélection des groupes neuronaux (T.S.G.N) basée sur trois principes.

- *Principe N°1* : Une espèce donnée possède une neuro-structure (répertoire primaire¹⁴) qui la caractérise.
- *Principe N°2* : Le comportement influence les réseaux neuronaux renforçant ou affaiblissant certaines connexions (répertoire secondaire¹⁵).
- *Principe N°3* : La coordination sélective des structures complexes interconnectées (connexions *extrinsèques*) par réentrée est à la base du comportement.

On parle de réentrée car les groupes étant interconnectés, deux excitations distinctes de deux groupes différents peuvent aboutir à une activation corrélée entre eux par la suite. Le lien créé entre les groupes (connexion neurologique dépendante) alors s'apparentera à une nouvelle entrée (réentrée) pour chaque carte.

Et la représentation dans tout cela ? Nous y sommes depuis le départ en définitive. Puisque les répertoires primaires et secondaires constituent des cartes, la sollicitation d'une carte ou d'un jeu de cartes constitue par définition la représentation interne d'une expression externe.

En quelque sorte, la représentation peut être assimilée à une cartographie globale¹⁶. Cette cartographie rend possible la liaison interne-externe c'est-à-dire l'association neurologique à un comportement moteur, à un échantillon sensoriel.

Edelman va plus loin dans cette voie ; il considère que l'activation neurologique (la cartographie interne) qui émerge¹⁷ de manière globale lors d'une action (le geste) est très proche de la cartographie qui est activée quand nous nous imaginons en train de faire cette action (ce geste).

Le geste et sa représentation sont portés par des cartographies-sœurs ou cousines germaines.

Concret et abstrait ont de nombreux attributs communs, le second étant plus « dépouillé ».

¹³ Edelman (1992) p134

¹⁴ Edelman (1992) schéma p130

¹⁵ Edelman (1992) schéma p130

¹⁶ Une cartographie globale est une structure dynamique contenant de multiples cartes locales réentrantes [...] capables d'interagir avec des parties du cerveau [...] connues sous le nom d'hippocampe [...].

¹⁷ Bruner (1966) propose dans sa catégorisation de la représentation le terme « énaactive »

Peut-on toutefois réduire la représentation à une approche duelle, geste par la pensée et geste par l'action ? La représentation peut aussi interroger d'autres considérations que le seul geste dans l'action. Elle peut prendre en compte le contexte émotionnel, les paramètres physiques de l'environnement, voire l'équation mathématique de la trajectoire d'un objet¹⁸.

Si la T.S.G.N est séduisante par sa clarté, sa simplicité de fond et son aptitude à répondre au concept en s'appuyant sur ces innombrables méandres connexionnistes, il faudrait sans doute élargir cette proposition à d'autres considérations.

On a tous l'image de ces « fous de la glisse » (les descendeurs en ski alpin) qui miment (par le geste) leur descente avant de se lancer sur les pentes vertigineuses. Ils se représentent leur trajectoire en « naviguant » de droite à gauche debout les pieds joints, les yeux fermés, en utilisant leurs bras comme simulateur. Il y a ici un exemple saisissant du paradigme que défend Edelman, la répétition par le geste d'un événement préalablement vécu puis repensé afin de mobiliser la cartographie globale qui lui correspond. Nul doute que ces sportifs sont à ces instants dans un état émotionnel intense qu'ils exorcisent en allant chercher au « très profond »¹⁹ d'eux-mêmes pour surmonter leur légitime appréhension devant ce qui relève de l'exploit. Ce processus de remémoration²⁰ mobilise tout ou partie des cartographies sensibles établies au préalable. Pour nos skieurs, l'état de la neige impactant les choix de trajectoires, les cartographies globales seront amenées à *suivre* ces évolutions (entre les deux manches²¹ les conditions peuvent fortement changer). Pour autant, on est ici, vraisemblablement, au-delà du seul geste qui compte.

I-2 La représentation est une notion complexe

Nous avons compris depuis le départ que le concept de représentations allait nous donner du fil à retordre, tant il est abordé sous différents angles, qui, s'ils nourrissent la réflexion, ne peuvent dégager en l'état de leur existence, de consensus immédiatement lisible.

Pour Sallaberry (1996) cette complexité peut être décrite selon quatre axes²² distincts.

- La triade *processus – produit - processeur*
- La triade *signifiant – signifié -réfèrent*
- La dynamique *sujet - objet*
- La dynamique *intérieur - extérieur (individuel-collectif)*

I-2-1 La triade *processus - produit- processeur*

Si nous sommes en mesure, à partir de sa description, de décrire ses contours, et à lui donner vie, c'est bien que la représentation est un produit. Cette dernière n'existe qu'à travers notre capacité à lui donner vie.

Cette forme de vie, chaque individu l'élabore selon un processus ; ce dernier modifie, remodélise, adapte les contours de la représentation au regard des conditions dans lesquelles le sujet évolue. En cela, processus et contexte sont intimement liés.

Les processus utilisés sont initiés par une « représentation-mère », laquelle agit comme processeur ; elle peut être tournée vers l'avenir quand un metteur en scène imagine sa scène une fois tournée ou vers le passé quand un écrivain rédige ses souvenirs d'enfance.

Le processeur guide le processus qui conduit au produit. La représentation se revendique des trois éléments de cette triade.

¹⁸ Argument avancé par Sallaberry (2004b) p31

¹⁹ Dans le sens où ils vont chercher la cartographie de nature à les mettre en confiance

²⁰ Edelman (1992) « Dans un tel système, la remémoration n'est pas stéréotypée. Sous l'influence de contextes qui se modifient constamment, elle change à mesure que la structure et la dynamique des populations neuronales impliquées dans les catégorisations originelles changent elles aussi » (p158)

²¹ En ski alpin, le temps est cumulé sur deux manches lesquelles peuvent être espacées de plusieurs heures.

²² Sallaberry (1996) p19-22 et (2004b) p33-34

I-2-2 La dynamique sujet – objet

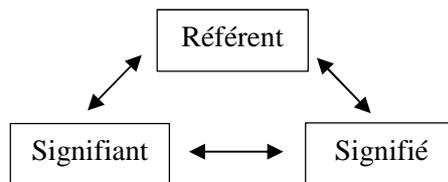
Peut-on imaginer qu'une représentation (un objet par exemple, donc un produit), élaborée par un individu (un sujet) puisse être sans intimité avec ce dernier. Il y a quelque chose d'autobiographique dans une représentation ; on y laisse toujours une trace de soi (certains diraient « des plumes ») ; parfois jusqu'à ne plus savoir si c'est l'œuvre qui identifie l'artiste ou l'artiste qui s'identifie par son œuvre. Certains vont jusqu'à les signer poussant cette dualité à un niveau de matérialisme qui frôle le voyeurisme. L'art moderne parfois peut surprendre, il interroge autant la représentation que l'artiste qui l'a construite.

La question « Qu'est-ce que c'est ? », que certains pourraient se poser en observant certaines des œuvres de Dorado²³, fait écho à la question « Qui a fait ça ? »²⁴.

I-2-3 La triade *signifiant – signifié -réfèrent*

Derrière la question précédente : « Qui a fait ça ? » se cache de manière implicite une autre question, plus intimiste : « Qu'a-t-il voulu nous dire ? ».

La représentation est autant le *réfèrent* (le produit, l'œuvre pour l'artiste) que le *signifiant* (ce que je peux saisir de manière perceptive comme une statue en bronze, un tableau réalisé à la peinture à l'huile), que le *signifié* (l'interprétatif, le déductif) qui relève de l'émergence du « sens » de l'histoire (voire son histoire) que l'auteur a voulu nous raconter. Si *réfèrent* et *signifiant* devraient avoir pour nous tous des dénominateurs communs, le *signifié*, lui, est la part intime de la représentation.



Cette organisation sémiotique que la représentation endosse, apparaît sous forme trilogique depuis Platon, Aristote et les stoïciens²⁵. Elle prend un appareil géométrique semblable avec Frege²⁶ (1892) pour lequel *signifiant* et *signifié* (*Bedeutung* et *sinn*²⁷) ont parfois du mal à se distinguer l'un l'autre. La triade est encore évoquée par Peirce²⁸ (1978) qui lui adjoint les terminologies (*objet/ représentamen / interprétant*).

Dans la mesure où la représentation est accolée à un réfèrent, (« les conditions de nécessité d'un signe sont fixées socialement... »²⁹) et que ce dernier n'a pas toujours d'explication rationnelle quant au choix du langage convenu pour le désigner, il est bien inutile d'y faire référence. Voici la position que développe Saussure (1915) qui propose de se focaliser sur la dualité *signifiant / signifié* excluant ainsi le réfèrent du domaine de la représentation.

Piaget (1979) aborde le passage du *signifiant* au *signifié* (de l'*abstraction réfléchissante* à la *réfléchie*) en lui donnant le titre de réflexion³⁰ (c'est pour lui le *réfléchissement*) sans pour autant pousser plus avant le concept de représentation.

²³ Dorado Noël : Artiste français né en 1968 qui mêle les univers de la mode et de l'art de manière très personnelle (cf. <http://www.noeldorado.com/> consulté en 12/2011)

²⁴ Lefevre (1980) La représentation est alors le savoir d'un vécu autant qu'elle est le vécu d'un savoir

²⁵ Eco (1988) p66 le triangle sémiotique possède les sommets (Expression / Chose ou état de choses / Signifié)

²⁶ Frege (1892) Über Sinn und Bedeutung (Sens et dénotation) dans la revue « Zeitschrift für Philosophie und philosophische Kritik »

²⁷ « vouloir-dire » et « sens » sont les deux traductions qui rendent délicates leur différenciation

²⁸ Peirce (1978) p229

²⁹ Eco (1988) p49

³⁰ Piaget (1979) p57 « De façon générale, tout réfléchissement sur un nouveau palier entraîne et nécessite une réorganisation, et c'est cette reconstruction productrice de nouveautés que nous appelons « réflexion » ».

I-2-4 La dynamique intérieure - extérieure : l'articulation individuel-collectif

Elaborer une représentation signifie en première approche qu'elle est construite « au sein » d'un individu, dans le siège de son cerveau. Cette intériorité peut-elle être exclusive ?

Tout d'abord, la construction de cette représentation prend son origine à l'extérieur de notre cortex. Qu'elle fasse référence à un vécu lointain ou immédiat, qu'elle se projette vers l'avenir, je dois aller chercher « ailleurs » des éléments de sa construction.

En outre, ces éléments me sont « étrangers »³¹ dans le sens où ils appartiennent à d'autres.

Peut-on tenter de mener un raisonnement par l'absurde³² ? Posons comme hypothèse que toutes représentations puissent être à ce point introverties (individuelles) qu'elles puissent, ne pas circuler vers l'extérieur (le collectif). Ceci nous amène à la conclusion qu'outre le fait que les éléments les constituant doivent être ma seule propriété, de telles représentations ne doivent pas être capables de transiter par un autre puisque je ne les partage avec personne.

Dans le premier cas, il n'est plus question de faire appel à l'extérieur, ce qui semble irréaliste à moins d'être né sur une île déserte et d'y vivre à l'écart de tous !!

Dans le second cas, conserver pour soi une représentation serait possible tant que je ne la dévoile pas. Ici le raisonnement devient plus subtil ; ne pas dévoiler son existence, ne signifie pas la rendre inaccessible. Il y a l'effet de mémoire génétique qui se transmet de manière intergénérationnelle³³ mettant à mal cet aspect moins lisible de l'hypothèse de départ.

Théories de l'institution³⁴ et du champ.

➤ La théorie de l'institution fonctionne en trois temps (cf. schéma 1 page suivante).

Le premier temps (moment) est celui de l'*Universel* ; il est le siège de la règle commune qui s'applique à tous. Par exemple : « Les hommes naissent et demeurent libres et égaux en droits... »³⁵. Le second temps est celui du *particulier*. Chacun prend en considération la règle et se l'approprie. Le troisième temps est celui du *singulier*. Il est le fruit de l'interaction entre les deux premiers temps. En effet, si la règle, agit, a une influence, sur le particulier (déjà institué), celui-ci en retour, agit, a une influence potentielle sur la règle (capacité instituante).

Le modèle est un système dynamique, où le singulier confirme ou infirme la règle déjà instituée, qui s'autorégule. Que devient cette théorie quand elle est appliquée aux représentations ? (cf. schéma 2 page suivante). Un sujet à partir des représentations instituées et admises de tous (*universel*), va élaborer ses propres représentations (*particulier*) dans une ambiance interactive qui peut³⁶ déboucher sur des représentations nouvelles (*singulier*).

Si l'on prend l'exemple cher à Bouthier (2007) d'un sport dit « collectif » comme le rugby, ce dernier a vu ses règles évoluer tout au long de sa propre « histoire ». Bouthier rappelle que c'est William Web Ellis qui prenant l'initiative de faire progresser le ballon « à la main », est le premier à avoir de par cette représentation du jeu (*particulier*) fait basculer « la soule »³⁷ vers un rugby moins violent (*singulier*) instituant une nouvelle règle (*universel*).

Bien que des règles existent, les arbitres eux-mêmes les interprètent³⁸ parfois dans « l'esprit du jeu » ou de manière plus stricte. L'articulation individuel-collectif est omniprésente dans ce sport de combat où les règles ne cessent d'évoluer pour dynamiser le jeu et protéger les joueurs (cas des mêlées ouvertes). Si certaines règles sont en apparence extérieures au jeu (enjeux économiques, professionnalisation) ce sont les joueurs, qui, sur le terrain, les rendent

³¹ Dans le sens où ils ne sont pas le reflet d'une partie unique de moi-même

³² Ce type de raisonnement est basé sur l'hypothèse d'une contre-vérité qu'il n'est pas possible de démontrer, donnant alors tout son sens à la vérité elle-même.

³³ Cf. *Supra Chap II (I-5)* pour l'idée de « noyau fixe » partagé par Piaget et Chomsky

³⁴ Sallaberry (2003) pp 75-110

³⁵ Déclaration des droits de l'homme et du citoyen 1789 (Extrait de l'article premier)

³⁶ Le cas limite est celui où le système reproduit les mêmes représentations.

³⁷ Jeu considéré comme étant l'ancêtre du rugby qui oppose deux villages voisins

³⁸ Bouthier (2007) p106

opérantes, les exploitent, voire les transgressent ce qui *in fine*, aboutit à leur validation, à leur adaptation, ou à l'invention de nouvelles règles. Ainsi l'introduction du carton « jaune » est en rugby pris comme exclusion temporaire³⁹ pénalisant alors toute l'équipe. Le recours à la vidéo depuis 1999 est une nouvelle règle qui facilite la prise de décisions. Dernières en dates, la redéfinition du raffut⁴⁰ et la durée des mi-temps qui passent de 10 à 15 minutes.

On pourrait avoir le sentiment que le moment du *particulier* est « absent » de toutes ces évolutions. Au contraire, ces règles sont prises collectivement car individuellement, sur le rectangle vert, des athlètes inventent, créent de nouveaux gestes, imposent des impacts de plus en plus physiques, font évoluer le jeu, obligeant les instances à faire évoluer l'*universel*.

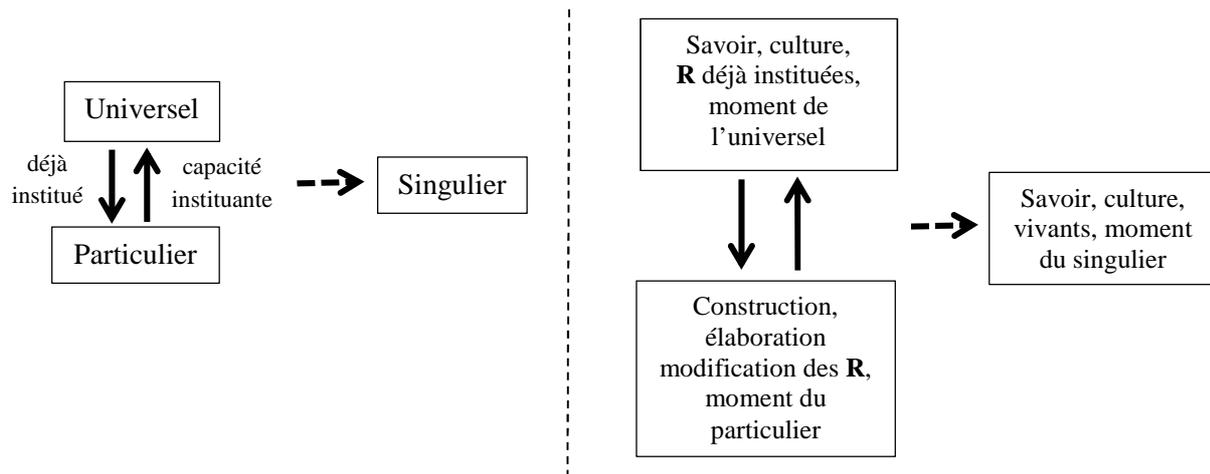


Schéma 1

Schéma 2

Une transposition immédiate à l'apprentissage suggère de devoir faire attention à ne pas trop imposer son propre *singulier* ou à le considérer comme un *universel* incontournable sous prétexte d'avoir réfléchi à ce qui semble le plus efficace. Chaque individu devrait pouvoir construire son propre *singulier* à partir de son *particulier* dans un environnement interactif d'accompagnement. Au rugby l'individu n'existe qu'à travers le groupe, ce qui donne à l'*universel* une saveur particulière.

➤ La théorie du champ est basée sur le caractère distribué des sujets et les interactions neuronales qui sont construites dans la psyché, zone du cerveau dont on peut considérer qu'elle est constituée d'un réseau très dense de neurones. En physique un *champ* est une fonction qui associe un nombre à chaque point de l'espace. Chaque point de l'espace est lui-même associé à un *potentiel*. Le *champ* dérive (est lié) directement du (au) *potentiel*. L'ensemble des potentiels des points de l'espace lui confère un champ spécifique. Cette théorie propose une analogie « potentiel-représentation ». La représentation est alors définie comme étant la fonction potentielle. Le sujet, par ses représentations, confère à l'encéphale des propriétés qui lui sont spécifiques.

Ce qui peut se résumer de la manière suivante : « Si la situation d'interactions distribuées peut être décrite par un champ, le système de représentation correspond à la fonction « potentiel » qui distribue le champ »⁴¹.

³⁹ L'exclusion temporaire est présente dans d'autres disciplines comme le Handball ou le Hockey sur glace.

⁴⁰ Le nouveau règlement 10.4 de l'IRB "geste réalisé par le porteur de balle pour écarter un adversaire en utilisant la paume de la main".

⁴¹ Sallaberry(2007) pp11-22

I-3 Proposition de concept

Sallaberry propose une hypothèse qu'il note (H_R) dont l'avantage principal est de concilier, les espaces transitoires (Absence/présence – sujet/objet – intérieur/extérieur) dans lesquels la représentation se fraie un passage, le tout dans un environnement à visée interactionniste.

« ..il suffit de concevoir que des « zones » de la psyché établissent des interactions – nous nommerons instances ces « zones » ».

Considérons que l'interaction entre instances se réalise par l'échange de représentations ; ce qui peut s'énoncer sous forme d'hypothèse (H_R) :

Une représentation est ce qu'échangent deux instances qui interagissent ; leur interaction se réalise par la construction, la modification, la circulation des représentations »⁴².

I-4 Discussion

La théorie du vivant

Les représentations en biologie prennent parfois des aspects surprenants avec les *homunculus*. Ces représentations sans échelle métrique illustrent la physiologie voire la psychologie humaine. Il y a dans ces représentations un témoignage de l'articulation interne-externe. Celles-ci prennent l'aspect d'un corps humain dont les parties morphologiques sont proportionnelles à l'importance que l'on peut leur attribuer au regard de divers paramètres, comme la sensibilité par exemple. Ainsi, dans ces représentations, certaines parties de notre corps, très innervées, sont disproportionnées (lèvres, mains, bouche, pieds). Toutes ces formes sont le reflet d'une mémoire génétique.

D'après Prochiantz (1995), la forme devient mémoire⁴³, la nôtre, celle de son environnement ; elle est donc sociale. La représentation transite entre intérieur et extérieur du sujet, alimentant ainsi le débat collectif en faisant de l'individu un témoin (au sens propre et figuré) privilégié de ces allers retours permanents entre l'enveloppe corporelle et son terrain de jeu. Dans la théorie du vivant, la représentation est une transposition entre la forme du gène et de l'organe (le corps de la drosophile est comme dessiné sur son chromosome), de l'organe et du corps. Ce sont les gènes du développement qui sont à l'origine de *l'individuation*⁴⁴ faisant ainsi de la représentation une forme externe issue d'un processus interne. La représentation est, pour la théorie du vivant, bel et bien une articulation interne-externe ; il m'arrive parfois de songer à cette réflexion qui m'a marquée, d'un professeur⁴⁵ à l'issue d'un test d'effort, me disant que j'avais un cœur de forme particulière. Cette forme peu classique était due selon lui, à une activité sportive trop intense chez un sujet jeune. Avec le recul, j'y vois là un exemple de l'articulation interne–externe de la représentation. Il y a ici une double adaptation : mécanique d'une part (la forme, le volume, l'organisation des tissus musculaires directement corrélée à l'activité physique laquelle est sociale et externe) et physiologique d'autre part, car l'espace disponible dans la cage thoracique peut imposer un développement spatio-temporel « anormal ». Le cœur qui se développe ne dispose pas de la place qu'il lui faut et évolue avec les moyens du bord.

Ainsi Prochiantz (1995) avance que si la pensée donne naissance aux *formes* (l'homme a parfois du mal à contenir ses émotions, quand il rougit par exemple), les formes sont des

⁴² Sallaberry (1996) p24 et (2004b) p35

⁴³ Prochiantz (1995) p125

⁴⁴ Penser qu'entre le début et la fin de la lecture de mon travail vous n'êtes plus le (la) même ; en effet les cellules qui vous composent ne sont plus toutes les mêmes ; à l'échelle d'une vie combien de fois aurons-nous entièrement changé ??

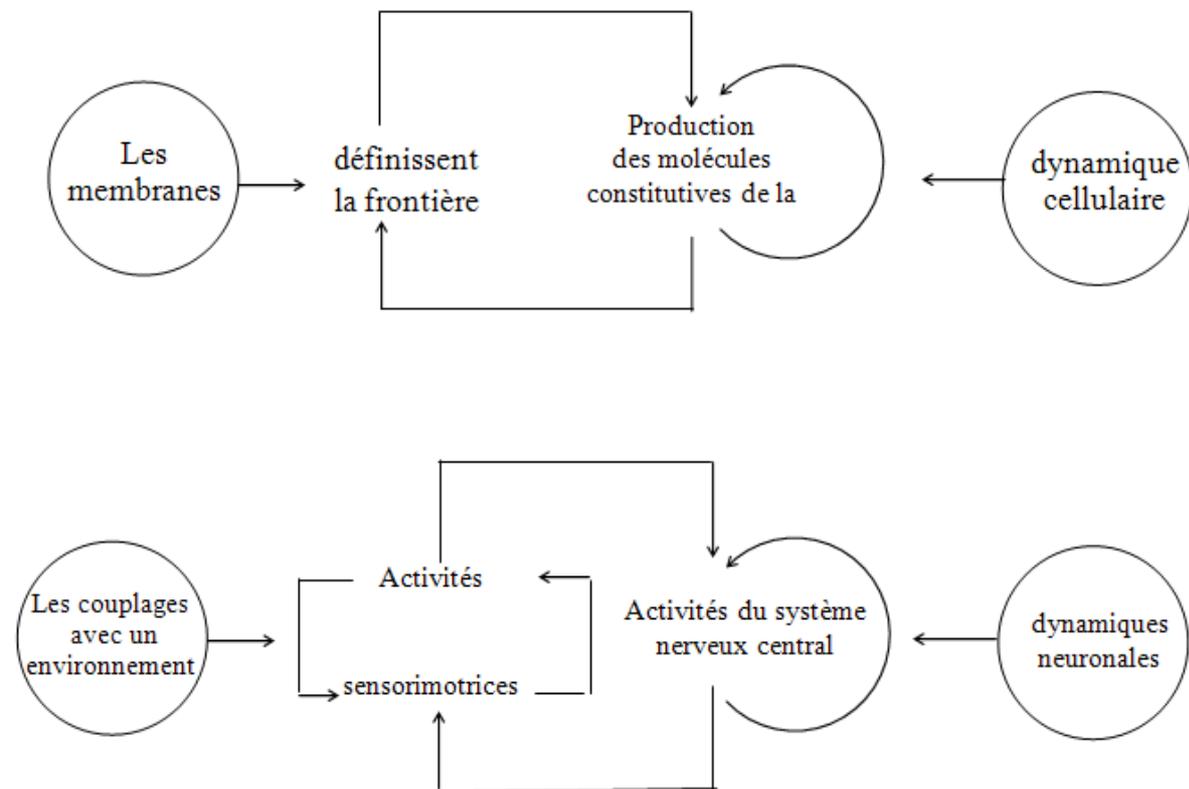
⁴⁵ Médecin du sport à l'hôpital X.Arnoz situé à Pessac

révélateurs de sa pensée. On peut alors avancer l'idée selon laquelle les formes peuvent être appréhendées en tant que représentations de la pensée.

I-4-1 L'apport des sciences cognitives

- D'après Varela (1989), la « ...représentation n'indique pas une correspondance entre ce qui se passe à l'intérieur du système et un certain état du monde extérieur, mais plutôt une certaine cohérence du système dans la façon dont il maintient continuellement son identité »⁴⁶. Le cerveau ne saurait être assimilé à une machine qui fonctionne par *input* et *output*. C'est la raison pour laquelle Varela récuse la représentation au sens fort, celle-ci errant dans un espace entre stimulus et réponse. En revanche il porte à la représentation l'idée de *clôture opérationnelle* qu'il applique dans un premier temps à la cellule.

De la « soupe moléculaire » émerge la cellule définissant et spécifiant alors ce qu'elle est et de fait ce qu'elle n'est pas. Les frontières sont le propre siège de leur existence où de nombreuses réactions moléculaires ont lieu.



Ci-dessus sont repris les schémas⁴⁷ proposés par Varela qui expliquent comment l'organisation cellulaire (*schéma N°1*) et le système nerveux (*schéma N°2*) peuvent être envisagés. Ce processus d'autoproduction ne permet pas de distinguer le producteur du produit. C'est ainsi que prend forme l'*autonomie* et « la vie » de manière générale.

Alors que les programmes officiels dès le premier degré mettent en avant les grandes fonctions (croissance, reproduction, nutrition, locomotion, naissance) pour aborder le vivant,

⁴⁶ Varela (1989) p11

⁴⁷ Varela (1989) p21et 28

Varela nous offre une approche d'une grande élégance. « Les systèmes vivants transforment la matière en eux-mêmes de façon que leur organisation soit le produit de leur opération »⁴⁸.

De tels systèmes sont dits *autopoïétiques*. Cette approche de la représentation portée au vivant fait la part belle à l'autonomie et complète utilement celle de Prochiantz. Ce dernier à propos du cerveau clame haut et fort : « Pire, ce dangereux organe pourrait avoir une pensée autonome échappant en partie à ma conscience, savoir avant moi, et mieux que moi, ce que je pense, ou désire. Angoisse sous un crâne ! N'est pas machine qui veut ».

-D'après Dupuy (1994), si les sciences cognitives peuvent revendiquer d'être autonomes, cela est dû à l'emboîtement logique de deux niveaux⁴⁹. Celui d'une part, de la représentation élémentaire et celui d'autre part, de la représentation de la faculté de représentation. Selon Dupuy, « connaître revient à effectuer des manipulations réglées sur des représentations » est une bonne formule pour rendre compte du courant cognitiviste fort. Pour peu que l'on y ajoute la logique, cette dernière tient alors le rôle de forme supérieure de la pensée. Nous serions particulièrement intéressés par le point de vue que peuvent porter les défenseurs du cognitivisme fort sur ces « êtres », que sont les *indécidables* et les *fractals*⁵⁰. Nous les laissons décider du sort qu'ils leur réservent. Pour notre part, ces « êtres » sont des pieds-de-nez à la logique que ce courant des sciences cognitives défend.

Si nous ne sommes pas capables de comprendre tout ce que nous créons, c'est bien que les symboles ne se suffisent pas à eux-mêmes. Dupuy fait l'analogie entre la théorie des « verres de spin » qui traite des comportements collectifs des atomes d'un cristal soumis à un champ magnétique avec les systèmes des couches de neurones en réseau. Il avance alors que penser revient à calculer comme le font ces réseaux. Ces derniers portent la signature de la représentation pour le connexionnisme.

Nous venons⁵¹ d'utiliser la théorie de l'institution pour modéliser l'articulation Individuel-Collectif. Nous allons aborder maintenant comment Sallaberry (2002) examine les liens de la représentation sociale avec la modélisation amenée par la théorie de l'institution.

I-4-2 La représentation sociale

S'appuyant sur Durkheim (1968) qui oppose représentations collectives et représentations individuelles, Moscovici (1989) dit de ces dernières qu'elles ne sont pas stables. Elles sont caractérisées par « ...la variabilité, dirait-on, le caractère éphémère.. ». Les premières, elles, au contraire, se caractérisent par « la stabilité de la transmission et de la reproduction ». Weber (1971) attribue à la représentation (collective) un pouvoir important qui « flotte dans la tête des hommes » et qui oriente voire guide leur activité. Selon Lévy-Bruhl, il n'y a pas de représentations collectives car ces dernières sont sociales. En effet, chaque groupe d'individu construit ses représentations au regard de son contexte et de son évolution. Ainsi on ne peut pas dire qu'une représentation d'un groupe est absurde ou entachée d'erreur(s).

Si certains voient dans « l'ombre » la présence de leur âme, d'autres, y verront l'absence de la lumière. Il est vain de tenter de donner raison aux uns plutôt qu'aux autres. Cette considération fait pencher les représentations du *collectif* vers le *social*. « C'est pourquoi des sociétés qui se représentent différemment le monde habitent des mondes différents »⁵².

Une représentation sociale est aussi une représentation cognitive.

⁴⁸ Varela (1989) p48

⁴⁹ Dupuy (1994) p21

⁵⁰ Un exemple d'indécidable [« c'est phrase est fausse » est vraie] ; un exemple de fractal : le tableau de M.C.Escher dans lequel un personnage se situe à l'intérieur d'un tableau qu'il est en train d'observer.

⁵¹ Cf. *Chap III (I-2-4)*

⁵² Moscovici (1989) p69

On peut voir dans la représentation sociale cette recherche ou cette affirmation d'une identité. Si Freud (1908) tranche en martelant que la représentation passe de la vie de tous dans la vie de chacun donc du conscient vers l'inconscient, Moscovici lui concède que « la notion elle-même a pourtant changé, les représentations *collectives* cédant la place aux représentations *sociales*. On voit aisément pourquoi. D'un côté, il fallait tenir compte d'une certaine diversité d'origine, tant dans les individus que dans les groupes. De l'autre côté, il était nécessaire de déplacer l'accent sur la communication qui permet aux sentiments et aux individus de converger, de sorte que quelque chose d'individuel peut devenir social, ou *vice versa*. En reconnaissant que les représentations sont à la fois générées et acquises, on leur enlève ce côté préétabli, statique, qu'elles avaient dans la vision classique. Ce ne sont pas les substrats, mais les interactions qui comptent »⁵³. Comme nous l'avons déjà évoqué⁵⁴ la représentation est un exemple qui se plie à la théorie de l'institution faisant la part belle à l'articulation individuel-collectif. Malgré tout, « le courant des représentations sociales interroge cette articulation, sans la modéliser directement » ce qui attribue à la représentation sociale « un statut ambigu »⁵⁵.

Cette idée d'interaction est reprise et exprimée de manière limpide par Codol (1982) : « ...ce qui permet de qualifier de sociales les représentations, ce sont moins leurs supports individuels ou groupaux que le fait qu'elles soient élaborées au cours de processus d'échanges et d'interactions »⁵⁶. Enfin, quand on s'appuie sur le concept de représentation il est difficile de ne pas être en phase avec la position de Codol.

Nous allons maintenant reprendre les différentes théories de l'apprentissage abordées au chapitre I, et rechercher ce qui les différencie dans leur manière de considérer la représentation.

I-4-3 Représentation et théories de l'apprentissage

- Dans l'approche « associationniste », la représentation est un stade intermédiaire entre le stimulus (S) et la réponse du sujet (R)⁵⁷. Elle est cette interface qui rend possible le lien (S-R), sans que pour autant ses contours, fussent-ils flous, soient véritablement abordés. Andler (1992) reproche au modèle de McCulloch et Pitts d'avoir totalement ignoré la question de la représentation. Il faut dire que les adeptes de cette théorie sont plus focalisés sur le résultat obtenu par le sujet que sur la manière dont celui-ci a pu vivre la situation.

- Dans l'approche « gestalt », la causalité étant avérée, le geste semble dominé et dominant. Il incarne la représentation à lui seul ; cette incarnation se joue dans la brusque réorganisation des structures. Ainsi, la représentation est-elle liée à cet *insight* qui la définit sans pour autant lui donner un sens plus abouti. Ici les gestes (les formes) sont bien assimilables aux représentations.

- Dans l'approche « opératoire », il y a ce qui rentre dans le domaine des opérations exécutées par le sujet avec des objets que je vois, et les opérations qu'il exécute sans que je puisse les voir *de visu*. Les premières sont concrètes, les secondes abstraites.

Ces considérations de bon sens invitent Piaget (1979) à proposer trois niveaux d'abstraction ; c'est ainsi que l'on peut dès lors, prétendre définir trois familles⁵⁸ de représentations.

⁵³ Moscovici (1989) p82

⁵⁴ Cf. *supra* Chap III (I-2-4)

⁵⁵ Sallaberry (2003) p94

⁵⁶ Codol (1982) p2

⁵⁷ Cf. *supra* Chap II (I-1)

⁵⁸ Bateson (1977) propose également trois niveaux logiques assez analogues (le niveau « réflexe » - celui mis en évidence par Pavlov / le niveau logique - celui du raisonnement / le niveau ultime - celui qui tient les deux premiers simultanément)

L'abstraction *empirique*, la *réfléchissante* et la *réfléchie*⁵⁹. La première porte sur l'extérieur du sujet, quand les deux autres portent sur l'intérieur de celui-ci. L'abstraction *empirique* est tirée des objets que le sujet manipule (ceux qui sont sur la table devant lui), et débouche sur des représentations concrètes. La seconde se joue à l'intérieur du sujet à partir de ses propres opérations ; s'agissant de la troisième, ces représentations internes préfigurent un stade plus abouti que les précédentes dont elles tirent leurs conditions initiales.

Pour Piaget, il est alors possible de dire que la représentation est à la charnière entre le concret et l'abstrait, entre deux intelligences, sensori-motrice et abstraite.

- Dans l'approche de la « médiation », la présence d'autrui prend beaucoup de place ; il ne s'agit pas d'avancer trop vite que les représentations se réduisent à « la médiation », mais elles tissent en présence de *l'autre*, des liens très intimes, voire confondants. Il est cohérent de penser la représentation comme une conséquence des interactions entre individus : ce que le sujet a pu produire lors de ces échanges *sociaux-cognitifs*, qu'ils soient entre pairs ou pas. Il est tout aussi acceptable de penser la représentation comme valeur ajoutée, due à la seule médiation. Extériorisée, la représentation peut s'évaluer en partie par les moyens d'expressions du sujet au cours de l'action. Il est enfin envisageable de penser la représentation comme un apport moins visible, car exclusivement interne, remettant à plus tard les symptômes extérieurs de cette existence et de son évolution.

- Dans l'approche « cognitiviste », les symboles sont définis dès le départ et par conséquent les représentations sont de fait asociales et inexorablement limitées. En effet, l'être social a ce domaine de liberté d'interprétation que l'activité binaire (une suite de zéros et de uns) ne peut prétendre, dès lors retranscrire avec une parfaite exactitude. Les représentations doivent répondre à des règles précises basées sur les trois principes de la logique formelle (*Premier principe* : identité⁶⁰ / *Second principe* : non-contradiction⁶¹ / *Troisième principe* : le tiers exclu⁶²). Ceci exclut qu'une représentation puisse transcrire deux propositions antagonistes⁶³. Pour ce paradigme, les représentations sont des symboles « rigides » obtenus avec des calculs « simples ». Le paradoxe en définitive vient du fait que ce paradigme, tout en donnant à la représentation une position incontournable de la pensée, la considère comme simple proposition logique. C'est une des raisons pour lesquelles Varela est très critique à l'égard de la représentation au « sens fort »⁶⁴. Cette position ne peut surprendre tant ce dernier réfute la logique de l'inéluctable.

- Dans l'approche « connexionniste », contrairement au paradigme précédent, la représentation n'est pas située au sein des symboles, mais elle dépend de l'état global du système. On parle de paradigme « sub-symbolique »⁶⁵. La représentation s'attache à donner une lecture à la signification du système et non pas à ce qui le définit (paradigme

⁵⁹ Piaget (1979) p53-58

⁶⁰ - « A est A » ce que dit Parménide ainsi : « L'être embrasse au plus près l'être »

⁶¹ - « A » et « non-A » ne peuvent coexister ; « Il est impossible qu'un même attribut appartienne et n'appartienne pas en même temps et sous le même rapport à une même chose » Aristote, Métaphysique, livre Gamma, chap. 3, 1005 b 19-20.

⁶² - « A est B » et « A est non-B » ne peuvent coexister ; « Il n'est pas possible qu'il y ait aucun intermédiaire entre les énoncés contradictoires : il faut nécessairement ou affirmer ou nier un seul prédicat, quel qu'il soit. » Aristote, Métaphysique, Gamma, 1011b23

⁶³ Par exemple : « Je regarde le ciel » (directement) et « Je ne regarde pas le ciel » (son reflet dans une flaque d'eau) ou bien « Je veux partir » et « Je ne veux pas partir » (pour le second principe).

⁶⁴ Alors qu'il est tout à fait favorable à la représentation au sens « courant » (cf. Sallaberry 2004b p93 où il relate une conversation privée avec Varela).

⁶⁵ Smolensky (1992) p87

« symbolique »). Varela⁶⁶ (1989) avance qu'il existe entre ces deux paradigmes un caractère d'inclusion⁶⁷. Mais il n'est pas très tendre quand il avance qu'il ne faut pas confondre « simulation » et « dissimulation »⁶⁸ en ajoutant que le cognitivisme confond les deux !

Pour Edelman, il n'existe pas de « carte-en-chef »⁶⁹ chargée de résumer l'information ce qui met à mal la théorie cognitiviste. Ironie du sort, cette dernière utilise la vitesse des connexions neuronales en cybernétique dans les laboratoires de pointe du M.I.T pour améliorer les performances du « souverain »⁷⁰. Pour les connexionnistes, il n'existe pas de neurone pontifical⁷¹ et il ne fait aucun doute pour Edelman que « ...c'est l'activité sensori-motrice sur l'ensemble de la cartographie qui sélectionne les groupes neuronaux donnant la sortie et le comportement... »⁷².

Pour Varela (1989), s'il récuse la représentation au sens du cognitivisme fort, il défend l'idée caractéristique de *l'énaction*. Cette dernière est « l'avènement conjoint d'un monde et d'un esprit à partir des diverses actions qu'accomplit un être dans le monde »⁷³.

Pour Changeux (2002), la représentation dans une considération connexionniste présente aussi des aspects sociaux. Il relate à cet effet les travaux réalisés sur des singes, lesquels apprennent des cris spécifiques d'alarme pour se protéger de différents prédateurs. Les adultes confirment le cri poussé par le jeune singe en l'exprimant à leur tour et s'abstiennent de crier dans le cas d'une erreur de leur progéniture. Ainsi, la validation va émerger par les jeux d'interactions sociales entre le jeune et l'adulte. Nous avons ici, une réponse à la question du lien entre connaissance et vie sociale. D'autre part, l'acquisition des connaissances serait liée à la sélection de pré-représentations. Cette dernière serait d'ordres environnemental et neuronal. C'est alors que l'on entrevoit une entrée possible entre représentation interne et « culture » !! Peut-on à la vue de ces considérations multiples et variées imaginer la représentation autrement que complexe ? Peut-on se risquer à vouloir concilier des approches sociales, humaines et celles qu'en donne la cognition ?

I-4-4 Représentation et didactique des sciences

En sciences, la représentation est un support sur lequel les collègues s'appuient très fortement. Dès le cycle 1 de la maternelle, faire représenter (re-présenter) à l'écrit les enfants permet d'observer une évolution cognitive. Les représentations sont des évaluations diagnostiques mais également formatives ; elles stabilisent et « obligent » l'individu à rentrer dans la tâche. Elles fournissent à l'enseignant des indicateurs qu'il pourra réinvestir pour moduler et adapter ses actions. Observer des représentations s'effectue souvent avec un filtre différent selon son propre champ d'investigations. Comment faire la part entre l'objectif et le subjectif ? entre l'explicite et l'implicite ?

- Orange⁷⁴ (2011) « voit » dans la représentation des éléments qui s'imposent à tous et d'autres qu'il faut aller chercher. S'appuyant sur le cas du trajet des aliments dans le corps avec des enfants de cycle 3, il interprète certains éléments des représentations (tuyaux

⁶⁶ Cf. *supra* Chap II (II)

⁶⁷ Varela (1989) p80 « De notre point de vue, la relation la plus intéressante entre l'émergence sub-symbolique et la computation symbolique est une relation *d'inclusion*, où les symboles nous apparaissent comme une description de plus haut niveau des propriétés d'un système distribué sous-jacent »

⁶⁸ Varela (1989) p31

⁶⁹ Edelman (1992) p133

⁷⁰ Je veux parler de l'unité centrale de l'ordinateur.

⁷¹ Changeux (2002) p82

⁷² Edelman (1992) p139-141

⁷³ Varela (1993) p35

⁷⁴ Conférence du C.R.R.E.F (Centre de Recherches et de Ressources en Éducation et en Formation) (10/2011) à Pointe à Pitre (Guadeloupe)

multiples avec ramifications, urine et selles séparées) comme des informations « cachées » sur les idées de *distribution*, de *tri*, ou encore de *transformation*.

Le recours aux représentations à l'écrit jalonne les démarches pédagogiques. Certaines sont individuelles d'autres collectives, certaines sont en cours d'élaboration quand d'autres sont plus institutionnelles.

- Bonan (2001) pour ces dernières préconise qu'elles revêtent un équilibre entre ce qu'il qualifie comme la part du verbal (les mots) et du non-verbal (les autres signes). Ainsi, « les schémas, suffisamment diversifiés, aident à passer des représentations figuratives et descriptives à celles explicatives et synoptiques.. »⁷⁵.

- Giordan et de Vecchi (2010) dans leur proposition d'approche *allostérique*⁷⁶ préconisent un environnement qui puisse interférer de manière permanente avec les conceptions⁷⁷ des sujets. S'agissant des représentations, les auteurs observent que, si le sujet se réfère à ses propres représentations pour avancer, celles-ci peuvent aussi le freiner dans son évolution. Par ailleurs, un sujet ne « lâche » pas ce qu'il tient (ou croit tenir) tant qu'une innovation n'est pas stabilisée, tant que le sujet n'est pas convaincu de la réalité et de l'efficacité de cette nouvelle représentation.

-Schneeberger⁷⁸ (1997), aborde le concept de représentation dans un contexte de formation des enseignants. Elle associe la représentation à un *symptôme* relevant du niveau d'acquisition de la connaissance d'un sujet à un instant « t » : « En organisant des échanges entre les formés, on les engage à préciser leurs idées, à donner des arguments pour convaincre des pairs. Cette technique permet ainsi de faire émerger leurs représentations et d'en faire apparaître la diversité »⁷⁹. Elle met en avant, en conséquence, ce qui relève au sein de la représentation, du domaine scientifique (les idées) sans pour autant aborder ici, semble-t-il, de manière explicite l'aspect social (ce dernier venant souvent impacter le premier). Le mot utilisé (diversité) étant très ouvert, il peut renvoyer tout autant à une palette de propositions diverses qu'à une identification d'ordre social. Toutefois, elle soulève, au-delà des enfants, l'interaction potentiellement conflictuelle qui existe chez les adultes, entre leurs représentations professionnelles et leurs représentations « de monsieur tout le monde », celles-ci pouvant se télescoper : « On peut faire l'hypothèse que les enseignants se trouvent pour la plupart dans la situation suivante : ils enseignent des connaissances scientifiques et, dans la vie de tous les jours, ils mobilisent leurs représentations plus ou moins archaïques mais qui "marchent" »⁸⁰.

Là, semble peser le paramètre « social », dans la mesure où le conflit des représentations est influencé par l'environnement propre à l'adulte.

Par ailleurs, la représentation est conçue comme un objet à valoriser qui guide, et régule l'action pédagogique : « En effet, nul ne peut prévoir exactement quelles sont les idées d'un élève sur un sujet donné »⁸¹ ; le maître adapte⁸² son scénario en fonction de l'analyse qu'il fait

⁷⁵ Bonan (2001) p37

⁷⁶ Cette approche décline les circonstances environnementales favorables à un apprentissage

⁷⁷ Les auteurs préfèrent le terme « conception » à celui de « représentation »

⁷⁸ Spirale (1997) HS N°2

⁷⁹ Schneeberger (1997) p265

⁸⁰ Schneeberger (1997) p267

⁸¹ Schneeberger (1997) p276

⁸² Sensevy (2002) p79

des représentations de ses élèves. Par ailleurs, la représentation est une cible privilégiée pour travailler des obstacles⁸³ présumés ou des obstacles non anticipés.

Pour Schneeberger, la représentation est un outil susceptible d'évoluer ce qui lui confère un statut d'évaluation. La valorisation de la représentation qui est alors au cœur de l'apprentissage témoigne d'un positionnement constructiviste : « Ce type de pédagogie faisant appel à l'activité propre de l'élève s'inscrit dans une perspective constructiviste en opposition avec les pédagogies transmissives. »⁸⁴

En résumé, dans un contexte de formation, la représentation serait un objet central digne d'être valorisé car elle est un allié pour l'enseignant et l'élève.

Cela étant, il semble important de pouvoir aborder la représentation sur un autre plan que celui du produit fini. Une analyse uniquement « extérieure » au sujet dans le sens où elle s'inscrit dans le cadre du champ de connaissance « scientifique » réduit certainement sa portée. Si les formateurs alertent sur l'intérêt de son utilisation, cette dernière reste centrée sur les enjeux disciplinaires, notionnels. Comment classer ces représentations ? Du reste, faut-il les classer ? Si oui sur quels critères ? : « Pour préparer nos étudiants, nous leur proposons des exemples de “catalogues” de représentations extraits de divers travaux de recherche et nous les entraînons à identifier les représentations les plus fréquentes »⁸⁵. Ces catalogues doivent-ils exclusivement se baser sur des approches notionnelles liées à une discipline ? Autant de questions qui restent en suspens car si Schneeberger nous éclaire sur la valeur ajoutée d'utiliser les représentations, elle n'aborde pas de manière précise comment rentrer à l'intérieur de l'élève qui les construit et comment appréhender son parcours cognitif interne. Dans le paragraphe II la question au centre de notre préoccupation sera d'interroger le cadre théorique de la catégorisation des représentations pour voyager « en interne », et tenter d'identifier des symptômes externes de « ce qui a bien pu se passer » au moment de la construction des représentations. C'est en cela, que le terme « catalogues » gagnerait sans doute à être précisé, ainsi que les critères d'identifications.

- Pour l'équipe⁸⁶ du CREN (2007), interroger la problématisation peut s'effectuer au travers d'un double filtre dichotomique entre ce qui relève de la *contrainte* et de la *nécessité* d'une part, de l'*empirisme* et du *modèle* d'autre part. Les représentations des élèves sont élaborées à partir d'un ensemble de savoirs (empirique) qui sera confronté à des objets scientifiques (modèles). Si la distinction entre une représentation à tendance, *contrainte* ou *nécessité* n'est pas toujours aisée à distinguer, la prise en considération de ces deux statuts favorise *a posteriori* la compréhension du débat et donc des représentations échangées qui se construisent autour de la mise en problème.

-Joshua et Dupin(1993) se sont efforcés eux aussi de pointer l'impact des *préconceptions* et *misconceptions*⁸⁷. Ils prennent acte qu'il existe un différentiel entre les conceptions des élèves et les modèles canoniques correspondants même si les premières répondent à leur propre logique : « ...ce sont les conceptions et modes de raisonnement liés au « sens commun » qui se révèlent bien plus enracinés que ceux produits par un enseignement scientifique, fût-il même de longue durée ». Pour Joshua et Dupin, de nombreux didacticiens, Closset (1989), Méheut (1989), Séré et Tiberghin (1989), Stavridou (1990), Viennot (1989), observent dans les conceptions une part de social, d'affectif, de rapport difficile avec les objets et/ou les

⁸³ Obstacles au sens où l'entend Bachelard

⁸⁴ Schneeberger (1997) p277

⁸⁵ Schneeberger (1997) p274

⁸⁶ Lhost – Peterfalvi – Orange (2007)

⁸⁷ Joshua et Dupin (1993) pp121-192 ; les premières sont celles que détient un sujet dès le départ ; les secondes sont celles parmi les premières qui sont éloignées du modèle scientifique.

personnes, d'écueil didactique, sans vraiment savoir quel peut être le niveau de responsabilité de chacun dans ce qu'ils analysent. La représentation est pour ces chercheurs un espace d'interprétation et d'analyse de la pensée des sujets.

-Sensevy (2002) aborde la représentation sous l'angle de *l'intention*. Celle-ci est autant dans « la tête de l'acteur » que dans l'émergence de «.. l'action elle-même, de l'environnement, du milieu auquel se trouve confronté l'acteur »⁸⁸. Pour autant, l'intention ne saurait être réduite à un objet qui attend sagement quelque part dans la psyché. Elle se construit dans un contexte donné entre « ..individus et situations-institutions »⁸⁹. Sensevy postule alors une modélisation en « ..trois niveaux de description :

- un premier niveau (les structures de l'action didactique) quadripartite, où les actions du professeur peuvent être décrites en référence à de grandes fonctions (définition, régulation, dévolution ; institutionnalisation)
- un second niveau, dans lequel la description s'organise en termes de « tâches », obtenues en projetant l'action du professeur sur des catégories très générales de l'action (le langage, l'interaction, le rapport aux objets, etc.)
- un troisième niveau, où la description est construite en termes de techniques, de trois ordres (chronogénétiques, topogénétiques, mésogénétiques)⁹⁰.

Ce modèle présente l'avantage de ne pas prédire le futur, au contraire, il permet de laisser de l'espace aux fractales⁹¹ et à la distribution des sujets. Chaque professeur pense la représentation didactique comme « *ce qu'il imagine qui pourrait bien se passer* ». Cette représentation doit être pensée comme un guide dont il faudra savoir se détacher. Nous retournons ici vers ce qui est du domaine de l'expertise et de *la règle des 3i* (trois i : intuition-imagination-improvisation).

Par ailleurs Sensevy nous alerte sur la liaison représentation et *attente* à laquelle mon passif est très sensible. Il évoque tour à tour le partage intentionnel, la métaphore du jeu, la nature coopérative et le sens du collectif. Il y a dans ces propos des vertus qui nous (me) parlent tout particulièrement.

Ayant enseigné la chimie une décennie dans la filière S.T.L⁹² au lycée Jay de Beaufort (Périgueux), je me souviens de ces longues séances de travaux pratiques durant lesquelles les élèves n'étaient pas avares d'idées. Je rends hommage à ces cohortes d'élèves qui m'ont amené à faire de si nombreux allers – retours au laboratoire qui était idéalement situé en face de la salle de classe. « *Il faut tester avec un autre indicateur* », « *On aurait pu le faire sous vide* », me disaient-ils le sourire aux lèvres. Combien de fois ai-je dû (eu la chance d') improviser, réagir à leurs attentes inattendues. Oui ils m'ont fait *bouger* aux sens propre et figuré, celui qu'en la circonstance je préférerais ! Nos actions étaient explicitement conjointes dans l'action. Ces interactions sont avec le recul un véritable bonheur car elles donnent le sentiment *d'être vivant*, et de participer à un « jeu collectif ».

Il ne saurait être question dans ce chapitre d'épuiser les différentes approches⁹³ et sensibilités de la communauté scientifique sous l'angle didactique à propos de la représentation. Néanmoins nous terminons par la proposition de Vergnaud dans cet article (1985) lequel sera

⁸⁸ Sensevy (2002) p70

⁸⁹ Nous sommes là très proche de l'idée développée par Pierson qui disait que le processus de sémiotique n'advient que dans l'interaction – la proposition de Sensevy s'intègre parfaitement dans l'idée précédente : fonder le savoir sur l'action conjointe c'est être très proche de l'interaction de par son caractère de réciprocité.

⁹⁰ Sensevy (2002) pp76-78

⁹¹ Objets mathématiques qui pour des conditions initiales très proches divergent fortement

⁹² Sciences Techniques de Laboratoire (F7)

⁹³ Toussaint (1996) chapitre 4 – Astolfi et Develay (2005) pp29-64

repris plus en détail au chapitre suivant s'agissant de l'apprentissage des concepts scientifiques.

-Vergnaud (1985) voulant afficher toute l'importance qu'il porte à la représentation pose trois incontournables « fondamentaux »⁹⁴ :

« 1- La représentation n'est pas un épiphénomène, une sorte de reflet après-coup de l'action adaptative du sujet dans son environnement ; elle est, au contraire, fonctionnelle et indispensable au traitement par le sujet de nombreuses situations.

2- La représentation ne concerne pas seulement l'utilisation par le sujet de systèmes de signifiants sociaux langagiers ou non langagiers : la communication sociale est certes un critère important de l'existence de la représentation, mais il existe d'autres critères, notamment celui de l'émergence en situation d'une conduite nouvelle, reposant sur la découverte et l'utilisation par le sujet d'une propriété ou d'une relation pertinente. En d'autres termes, beaucoup d'habiletés motrices impliquent la représentation, certains choix d'actions en situations supposent des calculs relationnels complexes dont il est impossible de faire l'économie.

3- La représentation doit être analysée dans toutes ses composantes fonctionnelles ; et les théories qui réduisent la représentation soit à ses aspects explicitement symboliques, soit à ses aspects procéduraux ne permettent pas de saisir l'ensemble de son fonctionnement».

Nous allons maintenant nous pencher sur quelques propositions de catégorisation des représentations.

II-La question de la catégorisation des représentations

Catégoriser est un acte simple en apparence, dans la mesure où ayant défini les critères de classement avec précision au préalable, on peut alors imaginer être en mesure de différencier.

Pour autant, catégoriser, sous-tend de pouvoir définir des attributs propres et exclusifs. Nous montrerons que les frontières inter-catégorielles ne sont pas toujours aussi nettes qu'on pourrait le penser. « Le trajet le plus court n'est pas toujours la ligne droite ».

II-1 Diverses propositions

Une première proposition consiste à distinguer les représentations verbales (lesquelles sont considérées comme arbitraires dans le sens où elles sont composées de signes qu'ils le sont eux-mêmes) des représentations basées sur l'analogie, voire sur la ressemblance (en référence aux objets).

Dans cette lignée, plusieurs approches sont convergentes. Celle développée par Denis et de Véga (1993) qui différencient représentation *analogique* et *arbitraire*.

Bresson (1987), en opposant *déclaratif* et *procédural* d'une part, *analogique* et *non analogique* d'autre part, se rapproche de ce courant de pensée.

Vygotsky, quand il fait, au cours du développement, la distinction entre substitut *fonctionnel* et *symbolique*⁹⁵ se situe dans la même sensibilité.

Toutes les catégorisations précédentes sont de l'ordre de la distinction *modale/amodale*⁹⁶. Les premières sont par exemple des images visuelles quand les secondes prennent l'apparence de propositions.

Freud, lui, oppose *inconscient* et *conscient* distinguant ainsi ce qui relève des représentations de choses (processus primaire) et des représentations de mots (processus secondaire). Le

⁹⁴ Les adeptes du ballon ovale apprécieront !! (ce terme est utilisé en rugby pour identifier ce qui fait autorité en termes d'ossature du jeu)

⁹⁵ Cette formulation est à attribuer à Galifret-Granjon (1981) p89

⁹⁶ Denis (1989) p48

passage du processus primaire au processus secondaire est rendu possible par l'utilisation du langage.

Piaget, sans s'être véritablement penché sur la catégorisation des représentations avance qu'il existe une différence entre le *figuratif* et l'*opératif*.

Pour Le Ny⁹⁷, la distinction se situe entre représentation *naturelle* et *rationnelle*, les premières s'apparentant à des représentations mentales que l'on produit naturellement (sans effort cognitif particulier) alors que les secondes demandent de faire preuve d'une logique qu'il faut construire.

Nous terminons ce premier tour d'horizon par les propositions dites à double codage⁹⁸, cette hypothèse ayant été formulée par Paivio, Rogers et Smythe (1968) pour mettre en évidence la supériorité de l'image (les dessins) sur les signes (les noms)⁹⁹. Ainsi Paivio distingue les représentations *images* des représentations *verbales*. Cette approche tente, plutôt que d'opposer, de relier deux processus.

La proposition de Weil Barais et Resta-Schweitzer

Mmes Weil-Barais et Resta-Schweitzer proposent une catégorisation¹⁰⁰ qui découle de l'approche *intra, inter, transobjectale* de Piaget et Garcia¹⁰¹, qui, s'ils ne catégorisent pas les représentations au sens strict du terme, proposent un modèle qui explicite les transformations des modes d'explication du monde au cours de la psychogénèse ; la lecture *intraobjectale* du monde étant celle de l'enfant dans le cadre de son développement « actuel » et qui renvoie à des représentations « naïves » avec lesquelles il découvre un ensemble de propriétés des objets, des événements, sans qu'il y ait d'explications plus avant (locales et particulières). En cours d'apprentissage les conceptions évoluent et la lecture du monde *interobjectale* devient potentiellement plus fine. Celle-ci, l'*interobjectale*, est le siège des explications qui font défaut au stade précédent : « les transformations ». Ce sont ces dernières qui ayant émergé, appellent à l'établissement de liaisons entre elles conduisant alors à l'élaboration de « structures » qui sont le fondement du dernier stade : le *transobjectal*. Ainsi tout au long de l'apprentissage il est possible d'avoir une lecture de la psychogénèse de l'enfant en repérant son évolution au regard de ses représentations du monde.

Piaget et Garcia tentent de construire un parallèle entre ces paliers de la psychogénèse et la construction de la pensée scientifique à travers sa propre Histoire (celle-ci se construisant en suivant la même¹⁰² chronologie des différentes catégories proposées : *intra-inter-transobjectale*)¹⁰³. À partir de ces considérations, les deux chercheurs proposent une catégorisation qui est résumée sous la forme d'un tableau (voir page suivante).

⁹⁷ Le Ny (1989) p33

⁹⁸ Denis (1989) p39

⁹⁹ Cette étude montre la supériorité du rappel des dessins sur les noms concrets et les noms abstraits en termes de disponibilité des codages imagés et verbaux dans un cadre mnésique.

¹⁰⁰ Les travaux ont été réalisés à l'école maternelle et publiés lors de la 8^e biennale de l'éducation et de l'information et repris dans la thèse d'état de Resta-Schweitzer soutenue en 11/2010

¹⁰¹ Piaget et Garcia (1983) p302-303

¹⁰² Piaget et Garcia (1983) p129 « Ce qui est remarquable dans cette succession intra-, inter- et trans est la coexistence de trois propriétés fondamentales. La première est qu'on la retrouve dans toutes les disciplines...avec la même régularité de succession.... Le second aspect frappant de ce processus est qu'il n'est pas spécifique à la pensée spécifique mais que, dans les études de la psychogénèse des notions au cours du développement cognitif des enfants, on retrouve le même ordre de succession et en fonction des mêmes mécanismes.... ».

¹⁰³ Il faut toutefois noter que Piaget (1968a -Ed 2007 -p26) en mathématiques, semble dire le contraire pour les structures algébriques et les structures d'ordre.

CATÉGORIES				
C1	C2	C3	C4	C5
<i>Hors modèle</i>	<i>Intraobjectale</i>	<i>Interobjectale Erronée ou incomplète</i>	<i>Quasi interobjectale correcte</i>	<i>Interobjectale</i>

Cette catégorisation est utilisée tant pour les représentations « écrites » que pour les représentations « orales ». La catégorisation C1 traduit ce qui pourrait être qualifié de « *hors de propos* ». Le sujet construit des représentations qui sont très éloignées voire qui n'ont pas de lien avec le travail attendu. La catégorisation C2 témoigne d'une construction qui donne quelques attendus sans pour autant qu'il soit établi de liens clairement exprimés entre eux. La catégorisation C3 est un affinement vers une représentation plus aboutie car renfermant des éléments mis en perspective. La catégorisation C4 regroupe des représentations qui sont désormais correctes tout en restant perfectibles contrairement aux représentations de la catégorie C5 qui elles sont désormais abouties.

Si l'on parvient à saisir le sens de cette catégorisation, il demeure une interrogation sur les critères utilisés pour mettre chaque représentation dans une « case ».

Ayant éprouvé cette catégorisation sur le concept de masse¹⁰⁴ en classe de maternelle, il m'aura été parfois difficile de trouver une catégorie qui puisse accueillir certaines d'entre elles sans douter. Mais peut-on imaginer qu'une proposition de catégorisation quelle qu'elle soit puisse échapper à la logique des bords ? Ceci permet d'avancer que si la catégorisation est adaptée au contexte d'étude (école maternelle) et au sujet d'étude (Thème *Ombre et Lumière*), elle resterait en l'état perfectible dans une perspective de généralisation et demanderait un travail d'adaptation par rapport au public d'une part (on pourra observer le transobjectif chez des enfants plus âgés) et au concept scientifique d'autre part.

Malgré tout, un suivi régulier et systématique peut vraisemblablement apporter de riches enseignements pour un enseignant, sur une évolution cognitive collective et individuelle.

II-2 La proposition de « Bruner »

Cette proposition (qui émane d'une réflexion collective¹⁰⁵) a pour objet un problème classique de la psychologie cognitive. C'est effectivement au centre d'études cognitives de Harvard qu'un petit groupe a tenté de décrire « ...trois moyens par lesquels les humains représentent le monde ou, mieux encore, trois moyens pour saisir ces invariants dans l'expérience et dans l'action que nous appelons « réalité » »¹⁰⁶.

Bruner et son équipe proposent de catégoriser les représentations en *énactive*, *iconique* et *symbolique*.

- S'agissant des premières, voici ce qui est proposé : « The first is through action...Enactive representation is based, it seems, upon a learning of summarizing images... »¹⁰⁷. Cette première catégorie s'inscrit dans une logique de l'action. On pourrait dire que ces représentations s'élaborent par l'action, pendant l'action (*au cours de l'action*¹⁰⁸). Trente ans plus tard, souhaitant préciser cette pensée, Bruner note alors : « Le premier mode est essentiel pour guider l'activité, et particulièrement ce que nous appelons l'activité qualifiée. Plus

¹⁰⁴ Fleury (2009) Sujet de mémoire de Master

¹⁰⁵ Bruner/Olver/Greenfield (1966) in « Studies in Cognitive Growth »

¹⁰⁶ Bruner (1996) p192

¹⁰⁷ Bruner/Olver/Greenfield (1966) p10-11

¹⁰⁸ Galifet-Granjon (1981) qui traduisant les propos de Bruner propose cette sémantique

généralement, c'est le mode qui impose des fins ou des structures instrumentales au monde. Si je devais aujourd'hui le rebaptiser, je l'appellerais le mode *procédural*.¹⁰⁹ »¹¹⁰.

- S'agissant des secondes : « ...There is a second system of representation that depends upon visual or other sensory organization and upon the use of summarizing images...Iconic representation is principally governed by principles of perceptual organisation... ».

Nous sommes dans le monde de l'image, pour ne pas dire le « pouvoir » de l'image ce qui nous renvoie implicitement à l'hypothèse de Paivio¹¹¹. Bruner avance en outre, que le seul fait de montrer, est la technique la plus efficace pour mettre en scène l'action. Il va plus loin en posant que les images donnent naissance et servent de prototypes aux classes d'évènements, ce qui aboutirait à l'élaboration d'une structure pré conceptuelle nous permettant d'agir sur le monde.

- S'agissant des dernières, celles-ci se définissent à travers la construction de systèmes symboliques (on pense alors aux représentations langagières). De ce tryptique, il semblerait que cheminer de l'action vers l'icône puis le symbole ait été perçu comme une progression, progression à laquelle Bruner aujourd'hui ne croit plus.

II-3 La proposition de Sallaberry

De toutes les propositions de catégorisation, celle de Sallaberry se différencie de manière singulière des autres. La singularité est profonde, car elle s'intéresse à la partie intime du sujet. On ne recherche plus ici à catégoriser le monde, à décortiquer une genèse, à opposer des critères, mais à tenter de comprendre le processus interne d'un individu par les indices externes qu'il a bien voulu nous donner. Il n'est plus question d'observer à la loupe mais bien de sortir le microscope.

En cela cette proposition est vraisemblablement la plus convaincante pour être adossée au champ des sciences cognitives.

L'outil est puissant et la vis micrométrique donne à voir ce qui n'était pas immédiatement observable. En terme didactique, il s'agit de tenter de comprendre ce qui s'est passé, plutôt que de parier sur une efficacité jugée vraisemblable. En tant qu'enseignant mon « réflexe acquis » a toujours été de mettre les sujets dans les conditions que je jugeais comme étant *les meilleures*. Prendre le temps de comprendre comment fonctionne un individu, peut donner, si ce n'est les clés, pour le moins des indicateurs qui doivent aboutir à une saine adaptation didactique. L'apport de Sallaberry réside en premier lieu dans son approche conceptuelle. Il pose comme base, la lecture de l'individu en le mettant « à nu ». Il s'agit d'identifier des indices, des plus « visibles » aux plus fins possibles, révélant d'un cheminement, *d'un processus*, d'une trajectoire cognitive, avec l'idée implicite de « toucher du doigt » des mécanismes qui permettent de construire des adaptations didactiques susceptibles d'accompagner, de dédramatiser, en réalité de faciliter les apprentissages les plus complexes.

Nous voyons dans cette catégorisation deux avantages majeurs :

- 1- Le langage n'est pas dissocié en image ou symbole, mais en lecture cognitive qui tente de rendre compte des visées intentionnelles des individus.
- 2- Les catégories ne sont pas conçues pour dissocier, opposer, mais pour construire un liant qui accompagne la pensée.

¹⁰⁹ Bruner choisit ce terme en référence à sa recherche sur la jurisprudence qui l'a amené à s'intéresser au fonctionnement du pays de la procédure (cour de justice, juristes, faculté de droit).

¹¹⁰ Bruner (1996) p193

¹¹¹ Cf. *supra* note 99

La proposition s'organise autour de quatre catégories (voir tableau ci-dessous) dont les trois dernières sont codées par les symboles : R1, R2 et R3 (coordinations R1-R2).

CATÉGORIES			
	<i>R1</i>	<i>R2</i>	<i>R3</i>
<i>Représentations inconscientes</i>	Représentation image à bords flous	Représentation rationnelle avec amorce d'hypothèse	Coordination active R1- R2

- Les premières bien qu'inaccessibles en tant qu'objets observables car non extériorisées sont les représentations inconscientes. Elles sont encodées et cartographiées et participent à l'émulation générale. Elles animent l'activité cognitive comme référent inconscient.

- S'agissant des représentations codées R1 : « *Les R1 ...ont des bords flous et installent, entre elles, un fonctionnement caractérisé par l'imprécision. Le propre d'une image, qu'elle soit picturale ou décrite à l'aide de mots, est justement de toujours faire penser à une autre* »¹¹². Sallaberry qualifie ces représentations de « représentations images ». Le mot image n'est pas conçu ici comme support obligatoirement « matériel ». Il faut comprendre production cognitive (matériel et/ou langagière) qui décrit une logique ambiguë, non aboutie, qui manque de netteté. Il y a un degré d'imprécision dans ces représentations qui ne permet pas de saisir le sens qui se cache derrière. Pour autant, et ce n'est pas un paradoxe, elles s'affirment comme un sas d'entrée pour atteindre un autre palier cognitif, celui des R2. Enfin, il est possible de les définir par défaut des R2 ; toute représentation qui n'est pas une R2 est une R1.

- S'agissant des représentations codées R2 : « *Les R2 ont vocation à utiliser ou à devenir des concepts* »¹¹³. « *Les R2, de par leur aspect hypothèse (ou, dans d'autres cas, de par leur aspect comparaison), s'inscrivent dans un souci de justification et de précision qui est celui du discours scientifique. Ce souci va exiger en permanence un affinement des bords.* »¹¹⁴. Sallaberry qualifie ces représentations de « représentations rationnelles ». Elles germent sur le terreau des R1. Elles se singularisent des précédentes par un processus d'*accommodation* qui permet de rendre plus net « ce que l'on veut dire » stabilisant ainsi un peu mieux « ce que l'on pense ». Il existe de nombreux symptômes lexicaux annonciateurs de R2. On peut penser en premier lieu aux hypothèses¹¹⁵, ou pour le moins aux indicateurs qui leur sont liés. Bien d'autres indices peuvent être retenus¹¹⁶ qui témoignent de cette évolution cognitive.

- S'agissant des représentations codées R3 : on peut concevoir ces représentations composites « *comme la manifestation d'une forme ou d'un niveau de pensée particulièrement puissants, correspondant à un saut qualitatif qui justifie l'idée d'un niveau logique supérieur* »¹¹⁷ ; on peut en outre voir dans cette caractéristique de représentations un témoignage de la créativité. Elles trouvent leur singularité dans l'interaction active et coordonnée entre R1 et R2. Sur le plan cognitif, il s'agit de réfléchir tout en faisant, de ressentir dans l'action. Dans le domaine du sport, certains joueurs « sentent le jeu » mieux que d'autres, ce qui leur vaut souvent d'évoluer à des postes-clés. On peut formuler l'hypothèse qu'ils sont en mesure de construire des R3 plus vite que les autres (ne dit-on pas d'eux en général qu'ils sont très coordonnés ?).

¹¹² Sallaberry (1996) p40

¹¹³ Sallaberry (1996) p32

¹¹⁴ Sallaberry (2004b) p45

¹¹⁵ Sallaberry adjoint aux R2

¹¹⁶ Cf. *infra* Chap VI (II-2) les indices des R2/R3 retenus pour l'analyse du corpus.

¹¹⁷ Sallaberry (1996) p41

Nous proposons ici d'illustrer concrètement ce propos à partir de deux exemples de situations didactiques, l'une en cycle 3¹¹⁸ et l'autre lors d'un module de formation¹¹⁹.

	Cycle 3	Master 2
R1	Les vers mangent les restes de légumes.	L'homme ¹²⁰ est assis en tailleur au fond de la piscine.
R2	<u>Je pense que</u> ce sont les vers qui fabriquent la terre.	<u>Je crois que</u> c'est un sportif de haut niveau.
R3	Les petits animaux jouent un rôle important <u>parce que</u> les vers purifient la terre <u>en mangeant</u> les déchets <u>avant de</u> les régurgiter.	C'est l'attitude d'un apnéiste qui <u>limite ainsi</u> sa dépense en dioxygène <u>ce qui explique</u> l'absence de bulles d'air sur la photo.

On peut apprécier l'aspect descriptif à bords flous des représentations R1 (on a du mal, à se représenter un ver festoyer, ou à expliquer qu'un individu puisse adopter une telle position) lesquelles en s'affinant tombent sous le regard des R2 (on commence à percevoir, un lien entre les vers, les restes de légumes et la terre, ou les raisons d'une telle attitude) ; enfin quand la dynamique R1 – R2 est atteinte, la représentation devient alors R3 et entre dans le cercle de la pensée structurante et structurée (on perçoit simultanément l'action et l'explication de celle-ci). On réalise ici l'intérêt de faire produire des R1 dans la mesure où les R3 en découlent.

Après avoir identifié le cadre théorique du concept de représentation et abordé quelques tentatives de catégorisations, il apparaît que dans les propositions existantes un grand nombre d'entre elles veulent souligner l'existence de *transitions cognitives*. En tant que formateur, il semble essentiel de retenir l'idée que l'école pourrait (devrait), entre autre, être le terrain d'un accompagnement dans le franchissement des transitions R1 vers R2 d'une part, R2 vers R3 d'autre part.

Malgré tous nos efforts, une représentation restera toujours une inférence¹²¹ ce qui impose humilité et discernement.

L'intérêt que nous portons à la représentation n'a rien d'idéologique. Notre recherche est centrée sur des processus, aussi seules les représentations peuvent nous aider à tenter de mieux comprendre comment un sujet construit les concepts scientifiques. Nous allons dans le chapitre quatre, convoquer ces outils complexes que sont les concepts pour mieux les apprivoiser.

¹¹⁸ À partir des représentations produites par des élèves de cycle 3 engagés dans le défi départemental 24 « Cyrano et la courge géante » (cf. portail IA de la Dordogne sur la plateforme FOAD lequel traite entre autres du vermicompostage consulté en 01/2012)

¹¹⁹ À partir des représentations d'étudiants du Master2 MEEF dans l'UE 3-3 sur Périgueux (Octobre 2011) sur une thématique liée à la respiration.

¹²⁰ Il s'agit de Stéphane Mifsud (champion du monde Français en apnée statique) assis en tailleur au fond d'une piscine lors d'un entraînement.

¹²¹ Cf. Chap V sur l'épistémologie

Chapitre IV Points de vue sur les «concepts»

Synthèse de ce chapitre

Sallaberry porte l'idée selon laquelle «... un concept scientifique est *quelque chose* :

- qui n'a pas de référent concret
- qui rassemble (synthétise) tout ce qui évoquait confusément la notion avant qu'il n'advienne et ne permette de désigner précisément,
- qui a des bords suffisamment nets, justement, pour que ce qu'il désigne (et ce qu'il ne désigne pas) soit clair
- qui est caractérisé par une structure (S, I, \mathcal{S}), celle de Vergnaud
- qui permet donc de mieux penser »

Dans cette quête des concepts scientifiques, nous nous interrogeons tout particulièrement sur le rôle, l'influence des invariants qui nous semblent des alliés très puissants.

La démarche d'un formateur se heurte à une difficulté récurrente qui est de trouver les moyens de faire passer un message qui soit le plus « lisible » possible. Si cette lisibilité dépend aussi de sa propre capacité d'innovation, certains objets comme les concepts, nous donnent plus de fil à retordre. Il semblerait¹ que ceux-ci soient des objets particulièrement complexes à enseigner.

Une première difficulté qui s'annonce est de définir ce que nous entendons par concept. Dès cette étape les approches divergent, ce qui rend d'autant plus délicate l'idée de vouloir poser le problème dans un contexte d'enseignement. Vouloir s'affranchir de poser la question préalable de ce statut que revêt un concept, c'est vraisemblablement se priver d'un moyen, en partie tout du moins, de le rendre plus accessible.

Nous essaierons, à travers plusieurs approches, d'observer comment un concept est appréhendé avant de nous focaliser sur une définition qui serait susceptible de convenir aux concepts, qu'ils soient scientifiques ou pas.

Puis, s'interrogeant sur la manière de les désacraliser, nous porterons cette idée qui pourrait se révéler comme un outil didactique puissant, facilitant dans le domaine des sciences physiques la compréhension des concepts de ce champ disciplinaire.

Cette idée est celle de Vergnaud (1985), selon laquelle, un concept est lié, entre autres, à un invariant, voire à un système d'invariants.

Nous montrerons enfin sur de multiples exemples en sciences physiques, mais bien au-delà, combien l'invariant paraît s'imposer de lui-même ; ce dernier entretient avec « son » concept une relation que certains biologistes pourraient qualifier *a minima* de commensalisme, quand d'autres iront peut-être jusqu'à accepter la métaphore de la symbiose².

I- Premières approches

En interrogeant des étudiants³ se destinant à embrasser le métier de professeurs des écoles sur la définition qu'ils pouvaient donner du mot « énergie », leurs réponses se sont attachées à aller chercher des formes (charbon, pétrole), des actions physiques (sauter, marcher, courir), des centrales (nucléaires, thermiques, éoliennes) voire des intérêts quotidiens (allumer une lampe, se déplacer en voiture, chauffer de l'eau).

À la seconde question leur proposant de se situer sur une échelle de 0 à 10 s'agissant de leur difficulté à construire cette définition, la moyenne des réponses s'est approchée de la valeur 8. En outre, aucun étudiant, sur une cohorte de 36, ne s'est situé en dessous de 5.

À la dernière question leur demandant de tenter d'expliquer s'ils trouvaient des raisons à une éventuelle difficulté à donner une définition, ils ont répondu⁴ principalement que l'obstacle majeur était que l'énergie « ce n'est pas réel » (12 occurrences) « ça n'est pas un objet (ou un matériel) », ou encore « on ne peut pas la toucher ». Trois étudiants seulement ont approché de très près l'idée artisanale (mais combien efficace) de conservation, reprise par Feynman⁵.

¹ Si l'on se base sur ce que vivent les enseignants dans leur quotidien et ce qu'ils nous rapportent, ce que j'ai pu vivre moi-même durant presque deux décennies en collège et lycée, ce qui m'était donné de pouvoir observer lors des visites de classes auxquelles je suis convié dans le cadre de mes missions à l'université.

² Dans le mutualisme animal quand une espèce vit aux dépens d'une autre sans lui nuire, on parle de commensalisme (le pinnothère et la moule), deux espèces sont interdépendantes : on parle de symbiose (lichen).

³ Ce travail de recueil des représentations initiales a été réalisé avec les étudiants de M1 du master MEEF (Métiers de l'Enseignement, de l'Éducation et de la Formation) sur l'antenne de Périgueux (24) en 2010.

⁴ Le bilan des réponses est le suivant : « ce n'est pas réel » (12) - « ça n'est pas un objet (ou matériel) » (9) - « on peut modifier la nature de l'énergie » (6) - « on ne peut pas le toucher » (4) - « c'est ce qui ne varie pas » (3) - « ça n'existe pas vraiment » (2) : 15% des étudiants dans ce groupe ont un parcours universitaire scientifique, mais ce ne sont pas ceux qui approchent pour autant le mieux le concept dans sa dimension de conservation.

⁵ Feynman (1999). Ce dernier aborde le concept de l'énergie par analogie avec une petite histoire qui met en scène un enfant jouant avec des cubes. Sa mère s'aperçoit qu'il manque un cube mais en cherchant bien le retrouve sous le tapis ; le lendemain il en manque deux et se rend compte que la fenêtre est ouverte et les

D'autres, enfin, ont abordé l'idée de transfert et de conversion : « on peut modifier la nature de l'énergie », ce qui est insuffisant, mais va dans la bonne direction. On touche ici à un obstacle essentiel relatif aux concepts. L'énergie pour certains, « ça n'existe pas vraiment ». Et pourtant, l'évocation du mot énergie fait émerger un nombre impressionnant de représentations chez chacun d'entre nous.

Comment peut-on être intarissable sur le sujet sans pour autant parvenir à définir le concept d'énergie simplement ?

Notre propos n'est pas ici de répondre à la question première qui est de définir le concept d'énergie mais bien d'illustrer concrètement le désarroi qu'il génère.

La réponse « ça n'existe pas vraiment » montre ce qui dérange. Il semble qu'il y ait tiraillement⁶ entre ce qui relève du *concret* et ce qui relève de *l'abstrait*. Et pour cause, le propre de tout concept est qu'il n'existe pas en tant qu'objet matériel, mais qu'il est construit par la pensée pour tenter de soulager les propos d'une discussion à son sujet qui s'annonce toujours difficile, voire relevant d'un pari.

Un handicap important que la majorité des concepts doit résoudre est qu'il ne s'appuie pas directement sur du concret alors qu'il évoque et renvoie à des objets qui eux le sont bel et bien. S'agissant du concept d'énergie, on aurait du mal à révoquer l'existence d'un débat sur l'avenir des centrales nucléaires, qui elles, sont des objets bien concrets, alors que comble de l'ironie, nous ne savons pas stocker l'énergie électrique, celle qui nous gouverne, et dont le côté immatériel ne vous aura pas échappé.

Un concept est-il pour autant assimilable à un *signifié* ? Si l'on se réfère au triangle sémiotique⁷, un concept devrait pour répondre positivement à la question précédente être connecté à un référent (matériel) ce qui ne semble pas être le cas pour un très grand nombre d'entre eux. Là, est posé en arrière fond, ce que l'on peut légitimement considérer comme étant « matériel ».

Toutefois, il est possible de porter la controverse au propos précédent en envisageant, pour le concept, un référent matériel d'ordre cognitif. En effet si le concept est un outil qui se construit par la pensée, on peut considérer que l'état global neurologique du système nerveux, en phase d'émergence⁸, peut alors constituer le support matériel du concept. Dans cette logique, le concept scientifique serait effectivement en phase avec l'apport de la sémiologie.

Nous allons aborder maintenant quelques différenciations dans l'approche qui est donnée au concept en repérant plusieurs tentatives de catégorisation.

➤ Vygotsky (1985) insiste sur le caractère essentiel qu'il y a à repérer la manière dont les enfants construisent les concepts scientifiques. On peut toutefois se montrer surpris qu'il prenne comme exemples les concepts de « lutte des classes » ou de « koulak »⁹ pour illustrer ce que seraient des concepts scientifiques. Il oppose les *concepts quotidiens* (ceux que l'on apprend sans y prêter attention, comme la langue maternelle) aux *concepts scientifiques* (ceux qui nécessitent un apprentissage conscient comme celui d'une langue étrangère).

aperçoit quelques étages plus bas. Elle imagine ensuite une manière de savoir combien de cubes, qu'elle ne peut plus voir, sont dans le bain de son fils en utilisant l'augmentation du niveau d'eau qu'occasionne un cube. A chaque fois *quelque chose* reste constant. C'est ainsi que Feynman tente de nous faire approcher l'idée de conservation de l'énergie.

⁶ Le mot « vraiment » témoigne d'une hésitation implicite entre concret-abstrait

⁷ Cf *supra* chap III (I-2-3)

⁸ Edelman (1992)

⁹ Paysan riche en URSS déportés en masse pendant le premier plan quinquennal initié par Staline (1928-1932)

➤ Barth (1987 et 1993) a engagé des travaux qui visent à porter secours à celles et ceux qui apprennent les concepts. Elle fonde tout particulièrement son travail autour de l'idée d'attributs (de points communs¹⁰). Le concept ainsi désigne la classe, l'ensemble des objets qui possèdent un même attribut. C'est un modèle qui convient tout à fait à de nombreux concepts en mathématiques (vecteur, suites) mais aussi en sciences de la vie et de la Terre avec la classification phylogénétique (évolution) ou en astrophysique (satellites¹¹). Toutefois, il existe une différence notable entre « le concept de camion » ou « le concept de fruit » et celui de *quantité de mouvement* ou d'*énergie*. Bien entendu, associer les mots camion et fruit à des concepts est de nature à faire progresser le niveau d'abstraction d'un individu, mais on peut accepter l'idée selon laquelle le concept de *force* se place à un autre niveau d'abstraction, plus *réfléchi*¹² celui-ci, que le premier.

➤ Lemeignan et Weill-Barais (1993)¹³ proposent de différencier les concepts scientifiques en *catégoriels* et *formels*. Les premiers fondent leur spécificité autour des attributs chers à Barth. Ainsi les auteurs définissent le concept de carré à partir de ses différents attributs : « Figure géométrique, correspondant à une portion de l'espace plan, délimitée par quatre côtés ; ces côtés sont égaux, ils produisent quatre angles droits »¹⁴. Les seconds correspondent aux concepts pour lesquels il y a transformation, comme pour les concepts d'élément chimique, de force, ou encore d'énergie.

➤ Migne (1994) s'appuyant sur Ullmo (1967 et 1969) afin de caractériser un concept dans le domaine de la physique se réfère à quatre concepts qu'ils nomment *inférieurs*. Ullmo les identifie de la manière suivante : [relation répétable – paramètre(s) – définition opératoire – objet¹⁵]. Migne propose ainsi l'opposition : concepts *inférieur* / *supérieur*¹⁶. Les concepts *supérieurs* regroupent simultanément les quatre concepts *inférieurs* précédents. Prenant l'exemple du concept de *résistance d'un fil*, il nous indique que, la relation répétable réside dans la reproductibilité du phénomène (une aiguille située au voisinage d'un fil parcouru par un courant électrique, subit une déviation (d) proportionnelle à la longueur connue (l) du fil) ; les conditions initiales exhaustives (relevant de la reproductibilité d'une expérience) qui se cachent derrière le caractère de relation répétable, renseignent sur les variables mises en jeu. Le paramètre réside dans le caractère constant du produit (l x d) ; les paramètres, eux, introduisent explicitement les mesures qu'il sera envisageable d'effectuer. La définition opératoire correspond à la description d'une procédure récurrente, alors que l'objet est assimilable à l'ensemble des propriétés qui le définissent.

Regards critiques sur les propositions précédentes

Contrairement à ce qui se dégage des deux propositions de Vygotsky et Barth, un concept scientifique ne peut pas dépendre d'attributs relevant d'un contexte social. C'est vraisemblablement un aspect essentiel qui le caractérise et le singularise. « Une maison »

¹⁰ *Conjonctif*: pour un ensemble d'attributs donnés, tous présents (« attribut du sujet ») – *Disjonctif*: pour un ensemble d'attributs non exclusifs (« charge électrique ») – *De relation* : qui ne peut être défini que par rapport à un référent extérieur (« grand », « cher »).

¹¹ Nous évoquons ici les objets non construits par l'Homme en révolution autour d'une planète.

¹² Piaget définit trois formes d'abstraction – *empirique* - *réfléchissante* – *réfléchie* ; cette dernière fait appel à des représentations de types interprétatifs lesquelles témoignent d'une capacité à prendre du recul.

¹³ Lemeignan & Weill-Barais (1993) pp 52-58

¹⁴ G de Vecchi (1992)

¹⁵ Ullmo (1967) pp623-705.

¹⁶ Migne (1994) nomme ces concepts : « concept surordonné de concept » p15

n'aura pas les mêmes attributs¹⁷ d'un continent à un autre. Les attributs doivent être stables¹⁸ pour imaginer qu'ils soient attribuables à un concept scientifique.

Revenons sur la proposition de Lemeignan et Weill-Barais. La distinction qu'ils proposent, si elle éclaire notre propos, se heurte toutefois à l'existence de concepts pouvant appartenir simultanément aux deux catégories (*catégoriels* et *formels*) ; en mathématiques on peut citer l'exemple du concept de *vecteur* qui rentre de par ses divers attributs dans les concepts *catégoriels* mais qui de par les opérations qu'il peut subir (variations des attributs) est aussi un concept *formel*.

Enfin, s'agissant de la proposition d'Ullmo repris par Migne, on peut noter que si la définition opératoire définit le processus à suivre, l'objet d'étude, lui, permet de donner du sens aux trois premières étapes. Toutefois, il n'y a pas, semble-t-il, dans cette approche pour repérer des indices, ce qui pourrait relever d'une catégorisation satisfaisante d'un concept scientifique mais plutôt la description des bases des conditions dans lesquelles l'observation de la construction d'un concept scientifique peut avoir lieu, en particulier en se donnant les moyens de repérer l'invariant¹⁹ ou les invariants. Par ailleurs, définir un concept, fût-il *supérieur* par accumulation de concepts *inférieurs*, est une position qui est loin de faire l'unanimité²⁰.

Nous poursuivons notre réflexion avec l'approche qui nous apparaît être la plus aboutie : celle de Vergnaud.

II- L'apport de Vergnaud

II-1 La structure (S, I, S)

Vergnaud (1985) définit une structure (S, I, S) de trois ensembles, pour toute étude du développement et du fonctionnement d'un concept \mathcal{C} . Voici comment il décrit ce triplet.

« S : ensemble des situations qui donnent du sens au concept.

I : ensemble des invariants opératoires qui sont sous-jacents au traitement de ces situations par le sujet.

S : ensemble des signifiants (ou symbolisations) qui permettent de représenter les invariants, les situations, les procédures de traitement.»²¹

- Le premier élément du triplet renvoie aux différentes situations pertinentes qui seront proposées à un sujet pour l'aider à construire le concept. En sciences physiques, il s'agira d'identifier une diversité de protocoles expérimentaux. Certains pourront être éprouvés par les élèves (en général durant des séances de travaux pratiques dans le secondaire) quand d'autres seront présentés en classe entière, par l'enseignant. Ces situations diverses et variées ont l'avantage d'attaquer le concept par la méthode d'encerclement²². Pour prendre d'assaut une forteresse, mieux vaut ne pas s'obstiner à vouloir rentrer uniquement par le pont-levis !

Ainsi la référence aux situations se justifie-t-elle, selon Vergnaud, par trois raisons, d'ordres « fonctionnaliste », « structuraliste » et « développemental et épistémologique ». Ainsi nous retiendrons les spécificités suivantes s'agissant de ce premier élément de la structure :

¹⁷ Entre un igloo, un pavillon, et une hutte on a des attributs très différents.

¹⁸ Cela revient à dire qu'ils doivent être reconnus au sein de la communauté scientifique

¹⁹ On peut avancer que l'invariant se cache dans la relation répétable. C'est ce que nous avons tenté de faire dans notre recherche avec les indicateurs de repérage de construction de l'invariant.

²⁰ Giordan (2010) p266 : « Les concepts ne s'élaborent ni séparément les uns des autres nipar accumulation de sous-concepts »

²¹ Vergnaud (1985) p247-248

²² Certains collègues préféreront l'idée de constellation qui se construit par petites touches en multipliant les angles d'attaque.

Il faut donner du sens aux actions : *À quoi cela sert-il ?*

Il faut diversifier les formes des actions : *Quelles procédures doit-on (faire) éprouver ?*

Il faut anticiper la chronologie de la complexité des actions : *Quelle progressivité va-t-on adopter ?*

- Le second élément du triplet désigne les invariants liés aux opérations induites par les situations mises en place. Vergnaud avance que ces invariants facilitent l'extraction des propriétés et la mise en évidence des relations du concept. En sciences physiques, la construction des concepts d'énergie, de moments d'une force, d'élément chimique sont à l'évidence gouvernés par un ou plusieurs invariants. Leur repérage est souvent le facteur déclenchant qui favorise l'élaboration du concept. Nous reviendrons plus largement sur ce second élément de la structure de Vergnaud²³ qui apporte un éclairage majeur, dépassant la sphère des seuls concepts en sciences physiques. Si les invariants en mathématiques répondent à des spécificités liées à cette discipline, il est légitime d'interroger celles qui pourraient s'avérer relever du champ des sciences physiques. Peut-on faire ici l'hypothèse que chaque discipline soit, entre autres, caractérisable par ses invariants tout autant que par ses concepts ? Nous tenterons de faire une proposition qui pourrait s'avérer audacieuse en ce sens un peu plus tard.

- Le troisième élément du triplet renvoie aux codes, aux langages spécifiques, aux symboles utiles pour désigner les outils qui éclairent le concept. Il faut désigner, déterminer (donner un nom), et ainsi construire²⁴ un langage qui appartienne au concept étudié. En sciences physiques, les concepts, comme le ou les invariants associés, sont souvent identifiables par un signifiant unique, voire un ensemble de signifiants²⁵. Ces derniers ne se limitent pas au langage formel, au lexique spécifique, ils englobent aussi les schémas, les croquis, les tableaux de valeurs, toutes ces représentations, dont la variété des symbolismes participe à part entière à la construction du concept. La résolution d'un exercice d'électricité va mobiliser les symboles des différents objets mis en jeu (générateur, diode, conducteur ohmique..), les symboles des grandeurs physiques (U / pour la tension électrique – r / pour la résistance interne de la pile...) et ceux des unités correspondantes (A pour l'intensité du courant électrique – Hz pour la fréquence d'un signal périodique...). Elle mobilise également les schématisations des montages électriques (lesquels sont codés entre autres à partir des symboles des objets et des grandeurs physiques, par des flèches sur les fils ou en dehors, selon qu'il s'agira d'un courant électrique ou d'une tension électrique) ainsi que les écritures calculatoires (qui renvoient aux lois fondamentales de l'électricité : loi d'Ohm, loi d'additivité des tensions, loi des nœuds et bien d'autres encore). Au final, tous ces signifiants sont des acteurs qui facilitent, à leur niveau, l'émergence de ces outils complexes que sont les concepts.

On comprend mieux pourquoi certains élèves en sciences peuvent avoir le légitime sentiment de devoir apprendre au fur et à mesure une véritable langue étrangère²⁶ avec ses incontournables exceptions²⁷.

²³ Cf. *infra* Chap III (III-2-1)

²⁴ Construire et s'approprier la spécificité d'un langage -

²⁵ E : concept d'énergie ; p : concept de pression ; $M(\vec{F})/\Delta$: concept de moment de la force \vec{F} par rapport à l'axe de rotation Δ (« delta »)

²⁶ Je me souviens de ma première sortie en VTT avec mon club, alors que je découvrais ce sport, et le sentiment d'avoir été « exclu » des conversations car ne comprenant pas les éléments de langage que ces initiés partageaient. Ce jour-là, toute proportion gardée bien sûr, j'ai mesuré la sensation d'exclusion que peut engendrer « la barrière de la langue ».

II-2 Les champs conceptuels

Vergnaud (1991) reprend en la précisant sa proposition initiale (celle de 1985) sur deux points. La structure (**S**, **I**, **S**) est conservée mais s'agissant du **I** et du **S**, ceux-ci deviennent :

« **I** : l'ensemble des invariants sur lesquels repose l'opérationnalité des schèmes.

S : l'ensemble des formes langagières et non langagières qui permettent de représenter symboliquement le concept, ses propriétés, les situations et les procédures de traitement»²⁸.

La nouvelle définition *pragmatique* qu'il donne d'un concept est la suivante :

« l'ensemble des invariants utilisables dans l'action » laquelle fait appel à « l'ensemble des situations qui constituent la référence de ses différentes propriétés, et à l'ensemble des schèmes mis en œuvre par les sujets dans ces situations ». L'auteur précise qu'un schème se définit comme étant « l'organisation invariante de la conduite pour une classe de situations donnée »²⁹.

Vergnaud utilise un exemple dans le domaine du sport (le saut en hauteur) pour illustrer son propos. Qu'il me soit autorisé ici de porter non pas la controverse au choix de cet exemple mais plutôt de contribuer grâce à lui, à une analyse des invariants en situations.

Le saut en hauteur, mais de manière plus générale un grand nombre de gestes dans le domaine du sport, est dépendant comme le dit Vergnaud, d'une organisation perceptivo-motrice³⁰. Le propre d'un athlète quel qu'il soit, est de pouvoir s'adapter à la situation nouvelle qu'il rencontre. Là est alors posée sa capacité à remettre en question les schèmes mis en place au préalable avec son entourage. Que se passe-t-il quand tout va mal, quand l'athlète perd ses repères et que son regard recherche désespérément celui de son « staff »³¹ pour obtenir une réponse à ses échecs ? On peut avancer l'hypothèse qu'il a perdu le fil de ses propres schèmes. On peut aussi prédire que l'entraîneur va s'attacher à le remettre sur *le droit chemin*³² des invariants installés ensemble. Pourtant, ce n'est pas toujours le choix gagnant. Dans cette adversité la victoire se construit aussi en « inventant », sur le moment d'autres schèmes³³.

Il n'est pas sûr en sciences physiques, mais aussi dans le domaine du sport, de pouvoir réduire à *un* invariant l'ensemble des invariants.

Toutefois, sur l'exemple du concept de « journée », lequel est assujéti à un ensemble de 4 invariants³⁴, on pourra toujours considérer que ce concept est lié à un invariant général constitué de 4 invariants distincts. Comme pour le concept de saut, le concept de « journée » rentre bel et bien dans le cadre de la structure (**S**, **I**, **S**).

Mais Vergnaud va plus loin encore, en définissant le « champ conceptuel »³⁵ à partir d'une double entrée, celle de l'ensemble des situations auquel fait référence la définition *pragmatique* précédente et celle des concepts et des théorèmes.

²⁷ On utilisera la lettre U pour exprimer la tension aux bornes d'un générateur qui débite un courant, mais E quand il n'en débite pas (force électromotrice).

²⁸ Vergnaud (1991) p145

²⁹ Vergnaud (1991) p136 : La force du lien entre concept et invariant(s) semble très importante jusqu'à les *confondre* : « La notion d'élément chimique est également un invariant.. » Khanflour-Armalé et Le Maréchal (2008) p120.

³⁰ Dans le langage courant, on dira d'un sujet qu'il est « coordonné ».

³¹ Groupe de personnes qui travaille avec l'athlète.

³² Soit en le conseillant directement soit par un langage de signes à eux pour déjouer les interdits de communication.

³³ Il faut parfois venir gagner un match au filet (au tennis) alors que l'on ne sait pas bien volleyer. On dira alors d'un joueur qu'il a changé son jeu. En définitive, il est sorti d'un schème devenu non-opérant pour en inventer un autre. On parle aussi de remise en question du « schéma tactique » mis en place au départ.

³⁴ Cf. *infra* Chap III (III-2) « Durée d'ensoleillement lors d'un jour solaire pour un lieu donné »

³⁵ « Considérons en premier lieu un champ conceptuel comme un ensemble de situations » (1991) p146 – «..on peut aussi identifier une deuxième entrée, celle des concepts et des théorèmes » (1991) p147

Cette approche exprimée de manière dissociée (1991), est plus tard énoncée de manière coordonnée³⁶ de la façon suivante : « ensemble de situations dont le traitement implique des schèmes, concepts et théorèmes, en étroite connexion, ainsi que les représentations langagières et symboliques susceptibles d'être utilisées pour les représenter ».

Si l'on retrouve les idées phares de *Genève* dans l'action et les schèmes, Vergnaud porte ici une théorie très puissante de par sa cohérence de fond d'une part, et de par sa transposition disciplinaire potentielle d'autre part.

Ainsi peut-on avancer qu'une telle structure (**S, I, S**) est susceptible de donner de la lisibilité, en sciences physiques, mais par généralisation, aux concepts des différents champs disciplinaires. Nous retiendrons tout particulièrement l'idée, selon laquelle, invariant(s) et concept sont intimement liés bien que génétiquement frappés de sceaux différents. Le second est génétiquement programmé pour rendre lisible le premier. L'invariant est au concept ce que sont les ribosomes à l'ADN³⁷, un décodeur d'informations génétiques.

Cette idée permet d'éclairer par exemple le concept de *dilution*, où l'invariant quantité de matière d'une espèce chimique donnée se traduit par une égalité mathématique³⁸ liant les concentrations molaires des solutions initiales et finales avec les volumes respectifs des deux solutions « mère » et « fille ». Nous pourrions retrouver également la pertinence de l'invariant pour le concept de *pression* où les actions agissant de part et d'autre d'une paroi sont liées aux surfaces sur lesquelles ont lieu ces actions. Le concept d'*énergie*³⁹ comme celui de *l'élément chimique*⁴⁰ sont eux aussi liés à un invariant qui se conserve lors de transformations. Que dire enfin du concept de *moment d'une force*, ou d'*intensité du courant électrique* pour lesquels les invariants force-bras de levier et débit des charges électriques⁴¹ se posent comme autant d'évidences apparentes, pour les plus initiés, il est vrai. En astronomie, le concept d'*éclipse* ne renvoie-t-il pas à l'invariant conjonction vraie⁴² ?

Nous pourrions poursuivre ainsi notre tour d'horizon des concepts en sciences physiques avec ceux de *quantité de mouvement*, de *vitesse* ou d'*accélération*, tous les trois assujettis à des invariants⁴³.

Cette intimité invariant – concept promet à la didactique des sciences physiques non seulement d'autres entrées possibles, mais facilite l'identification même de ce qui relève d'un concept et de ce qui n'en relève pas. Cette première réflexion pourrait se résumer de manière simpliste et lapidaire, par la formule suivante : « *pas d'invariants lisibles ou supposés, pas de concept scientifique* ».

L'apport de Vergnaud qu'il livre sur un plateau et par ricochet aux sciences physiques peut revêtir un apport, si ce n'est décisif, pour le moins prometteur pour « notre » discipline. Celle-ci, depuis plusieurs années pâtit d'une fâcheuse réputation dans le monde scolaire. Malgré les

³⁶ Vergnaud (1995) p71

³⁷ Les systèmes vivants se retrouvent avec une batterie d'enzymes dont le rôle principal est de lire et de décoder l'information génétique portée par l'A.D.N (Acide DésoxyriboNucléique)

³⁸ On prélève une quantité de matière n_m d'une espèce chimique de la solution mère pour l'introduire dans un objet de volume V_f de la solution fille ; cette opération s'effectuant à quantité de matière constante (voici donc l'invariant), on aboutit à la relation d'égalité entre les quantités de matière prélevée n_m et introduite n_f dans l'objet. La quantité de matière d'une espèce étant égale au produit de sa concentration molaire par le volume de la solution, l'égalité s'écrit alors $C_m \cdot V_m = C_f \cdot V_f$

³⁹ Cf. *supra* Chap IV (I)

⁴⁰ Cf. *infra* Chap IV (III) et Chap VI (II-1-1)

⁴¹ Pour des circuits autres que les lignes de transport.

⁴² La conjonction est dite conjonction vraie lorsque les astres ont des longitudes célestes géocentriques ou héliocentriques égales et de même latitude se trouvant donc sur un même rayon visuel.

⁴³ Sallaberry (2004b) pour les propositions d'invariants liés aux concepts d'inertie, de vitesse et d'accélération pp126-130.

multiples efforts, elle continue à osciller entre austérité et tentatives apparentes de séduction à l'image de « l'homme qui rit »⁴⁴, sans parvenir à trouver l'adhésion tant convoitée.

III- Concept et définition du concept

Avant de proposer un faisceau d'éléments pouvant éclairer la définition d'un concept scientifique, nous souhaitons mettre à l'épreuve des sciences physiques la proposition de Vergnaud selon laquelle tout concept serait lié à un ou plusieurs invariants.

III-1 Le concept d'élément chimique : perspectives historiques

S'il est *un* concept incontournable en chimie, alors celui d'«élément chimique» s'impose naturellement. Nous vous invitons à un petit retour en arrière pour retracer brièvement « son » histoire et mieux comprendre ce qu'*il* est aujourd'hui.

Nous débutons avec les présocratiques⁴⁵ qui proposent des approches antagonistes de la construction de l'univers. L'école de Milet recherche *l'archè* (brique élémentaire) car la matière serait constituée d'une seule et même entité universelle. Pour Anaxagore la matière est divisible à l'infini et constituée d'*homéoméries*. Ce sont des *petits objets d'un ensemble semblables à l'ensemble* lui-même. Pour Leucippe et Démocrite, la matière est constituée d'atomes insécables « l'atome est un morceau de matière très dure, inattaquable de l'extérieur » à savoir « les derniers corpuscules en quoi il est possible de diviser la matière »⁴⁶. Enfin, Empédocle pensait que les quatre éléments (terre, air, eau, feu)⁴⁷ fonctionnaient avec deux autres principes (amour et discorde) par antagonisme ; bien plus tard Aristote reprendra cette hypothèse en proposant une interaction par opposition entre sec et humide – froid et chaud pour les quatre « éléments fondamentaux ».

Il faudra attendre les travaux de Lavoisier et leur publication (1789) sous le titre « Traité Élémentaire de chimie » pour parvenir à une étape clé qui est celle de distinguer les *corps composés* (H₂O ; NH₃) des *corps simples* (H₂ ; N₂), lesquels se décomposent en atomes différents ou identiques. Puis jusqu'à la fin du XIX^e siècle, ces deux distinctions sont embrouillées avec celle de l'élément. La précision des expériences, l'accroissement des espèces identifiées, la multiplicité des transformations maîtrisées aboutissent à des interrogations multiples. Les calculs de Lavoisier montraient que lors d'une transformation chimique entre le métal fer et l'air la masse restait constante.⁴⁸ Gay-Lussac (1808) montre que les volumes de deux gaz se combinant entre eux sont dans des rapports simples. La même année, Dalton considère que les combinaisons doivent se faire atome par atome et « qu'à chaque élément correspond un atome bien défini »⁴⁹.

Mendeleïeff⁵⁰ est le premier à avoir pris conscience de la distinction *corps simple/élément*.

Comme le dit Martinand⁵¹, la distinction entre les deux termes est la suivante :

« -corps simple, terme de l'analyse chimique, donc concept empirique étroitement rattaché aux techniques d'analyse et aux tests de reconnaissance, et qui est la seule notion réellement dégagée par Lavoisier

- élément, concept abstrait, base d'une interprétation théorique des réactions chimiques ».

⁴⁴ Victor Hugo (1896) écrit un roman dont le personnage principal mutilé a un visage qui rit en permanence.

⁴⁵ VII-VI siècle avant J.-C

⁴⁶ De Crescenzo (1999) p193 et 202

⁴⁷ Ibid p152 « -Les racines des choses sont au nombre de quatre : - Zeus le Resplendissant, Héra la Vivifiante - Aédon, et Niobé qui de ses larmes - distille la source immortelle - » extrait d'un poème d'Empédocle.

⁴⁸ Borvon (1990) pp39-55

⁴⁹ Lefort (2003) p19

⁵⁰ On peut comme le propose Sallaberry (1993) aborder le tableau de Mendeleïev comme permettant aux éléments chimiques de constituer un système de signes.

⁵¹ Martinand (1986) p155

Martinand (1986) propose un texte très précis sur le concept d'élément dont sont retranscrites ci-après les grandes lignes directrices.

[Les poids atomiques sont propres aux éléments et les moléculaires aux corps simples et composés. C'est bien le concept d'atome qui se rattache à celui d'élément et pas le contraire.

À ce sujet, on observe souvent que les points de vue « atomistiques » et « élémentaires » sont en concurrence. S'agissant des réactions chimiques, l'«atome» ne se conserve pas. Il faut avoir une bonne maîtrise dans la connaissance des structures électroniques pour obtenir une interprétation valide de la conservation des éléments.

Le concept d'élément est à rapprocher des transformations chimiques (de la matière). L'élément dans une approche d'analyse, est ce qui est commun aux corps simples et composés donnant des tests identiques.

Ce qui apparaît fondamental est qu'il n'y a pas de possibilité de transmutation l'une dans l'autre des espèces chimiques simples lors d'une transformation chimique. Ainsi il n'est pas envisageable de penser « obtenir n'importe quoi à partir de n'importe quoi »⁵².

Ainsi sur un plan qualitatif, c'est la présence d'un même élément dans deux composés distincts qui leur confère des propriétés communes.]

Nous concluons en donnant l'approche actuelle qui fait consensus sur ce concept d'élément chimique à savoir : *c'est ce qui se conserve lors d'une transformation chimique.*

L'invariant pour le concept d'élément chimique est un invariant *par transformation-conservation*. Il y a bien sûr des limites à toute approche scientifique d'un concept. Celui de l'élément ne fait pas exception. Les isotopes, la radioactivité peuvent sembler « affecter » l'élément dans son approche précédente ; en réalité celle-ci en ressort renforcée. Il y a les échanges électroniques : le monde de l'élément, et les échanges de particules qui affectent les structures fondamentales : le monde nucléaire. Quand on prétend définir, il faut interroger le domaine de référence⁵³.

Nous reviendrons plus longuement sur la manière de définir le concept d'élément chimique⁵⁴ dans un cadre didactique au lycée.

III-2 La problématique des « saisons »

Le mot saison vient du mot latin *satio(nis)* qui signifie semaille(s). Ce mot apparaît vers le XII^e siècle. Il identifie au départ, le premier temps (printemps), celui des semailles. Doit-on, sous prétexte que ce mot est emprunté à une expression langagière ancestrale, considérer qu'il n'appartient pas au domaine des concepts scientifiques⁵⁵ ?

Vouloir s'appuyer sur les considérations sociales (hors saison, haute saison, pleine saison...) mène dans l'impasse. Par ailleurs, les considérations climatiques (saisons des pluies, des cyclones, saison sèche...) ne nous sont d'aucun secours tant leurs bords sont flous et assujettis aux effets de contexte. Nous en profitons pour rappeler que ce qui singularise un concept scientifique, est de posséder des bords nets, ce qui renvoie à des représentations de

⁵² Martinand (1986) p160 / Les alchimistes pensaient pouvoir transformer les métaux (« vils ») en métaux nobles comme l'or ou l'argent

⁵³ L'IUPAC donne deux définitions d'un élément chimique orientées toutes les deux sur les structures profondes sans nous éclairer sur une définition du concept d'élément chimique.

chemical element

1-A species of atoms; all atoms with the same number of protons in the atomic nucleus.

2- A pure chemical substance composed of atoms with the same number of protons in the atomic nucleus. Sometimes this concept is called the elementary substance as distinct from the chemical element as defined under 1, but mostly the term chemical element is used for both concepts.

⁵⁴ Cf. *infra* Ch V (II-1-1)

⁵⁵ Pour Cohen-Azria (2007) p35 un concept peut être scientifique, scolaire ou quotidien

types R2⁵⁶. L'affinement des bords par le processus de séparation⁵⁷ est un témoignage de la singularité de la construction d'un concept scientifique. En cela, un concept scientifique se singularise d'un autre par ce qu'il désigne, autant que par ce qu'il ne désigne pas. S'agissant du supposé concept de *saisons* en sciences physiques, il ne désigne ni climat, ni organisation sociale. Il nous faut rechercher l'invariant ailleurs. Bien qu'il navigue entre représentations sociales, pour lesquelles les effets de contexte lui prêtent des approches très différentes, représentations géographiques, et représentations scientifiques, nous laisserons de côté son caractère nomade⁵⁸, pour nous focaliser sur son appartenance éventuelle au domaine des concepts scientifiques, en allant chercher des réponses d'ordres strictement scientifiques.

Selon la proposition de Vergnaud, si concept il y a, invariant(s) il nous faut identifier. Ici, pour ce concept, voici l'invariant que nous pouvons donner : *une saison est la durée qui sépare un équinoxe d'un solstice*. Equinoxes et solstices sont les quatre points d'intersection entre l'ellipse (forme de la trajectoire qu'effectue notre planète autour du soleil) et ses deux demis grands⁵⁹ et petits axes. Bien que la mécanique céleste engendre des perturbations de positions des différents acteurs et que notre étoile soit amenée à nous dévorer⁶⁰, nous pouvons donc avancer qu'à l'échelle de l'humanité, il existe bel et bien un invariant pour ce qui est du *concept de saison* dans sa version scientifique.

Bien entendu, l'existence d'un invariant pour le concept de *saison*, alors qu'il n'est pas très évident au départ, ne postule pas que tous les concepts en sciences physiques soient liés à un invariant ou à un système d'invariants. Pour autant, le transfert de la proposition construite par Vergnaud en mathématiques, vers les sciences physiques ne la réduit pas à un simple axiome⁶¹ ou postulat⁶² ; il est convenable d'avancer que l'utilisation en sciences physiques de cette proposition soit une induction⁶³. Ceci alors sous-tend qu'elle puisse conduire à une conjecture qui pourra se révéler fautive à la suite de la découverte d'un contre-exemple⁶⁴. Nous en acceptons, il en va de soi, dès le départ, le principe.

III-3 La liaison invariant(s)-concept

Il existe des concepts dans le champ disciplinaire des sciences physiques pour lesquels l'identification d'un invariant voire de plusieurs paraît moins immédiate.

C'est le cas du concept de tension électrique. Postuler que ce concept n'en est pas un, sous prétexte que l'invariant est plus ardu à identifier, nous invite à poursuivre plus avant l'investigation, plutôt que de vouloir lui ôter son éventuel statut. Nous donnons (page suivante) des exemples, sur le champ disciplinaire des sciences physiques, de quelques liaisons *visibles* (repérables) entre concepts scientifiques et invariant(s) en balayant quelques domaines de la physique (mécanique, optique, électricité et astronomie) et de la chimie (minérale, organique).

⁵⁶ Cf. *supra* Chap III (II-3).

⁵⁷ La séparation entre température et chaleur qui renvoie respectivement à des grandeurs intensives et extensives permet de concevoir les échanges de chaleur entre deux systèmes pour atteindre un équilibre thermique.

⁵⁸ Stengers (1987) p19 prend l'exemple du concept de *programme* qui aura transité du domaine de l'informatique vers celui de la génétique ; dans cet ouvrage, Veuille, aborde par ailleurs la notion de *concept pirate* lequel est construit de toute pièce sans référence opératoire ou observée et possède un caractère interdisciplinaire: c'est le cas du concept de *corrélation*.

⁵⁹ Les deux intersections avec le demi grand axe se nomment périhélie et aphélie (respectivement la plus proche et la plus éloignée du soleil).

⁶⁰ Quand notre étoile fusionnera son hélium, elle « gonflera », deviendra une *géante rouge* et volatiliserà Mercure, Vénus, Mars et... la Terre.

⁶¹ Un axiome est une propriété évidente dont la vérité est reconnue sans démonstration

⁶² Un postulat est un principe qui doit être admis comme vrai sans démonstration

⁶³ Une induction est un raisonnement qui va du particulier au général

⁶⁴ C'est le cas, du nombre n de diagonale d'une figure convexe de sommet p, qui semble être prévisible mais qui ne l'est plus à partir de p =7 (n = 14 au lieu de 12 présupposés).

Domaine scientifique	Concept	Invariant associé
Astronomie	Eclipse	Conjonction vraie
Mécanique	Pression	Egalité entre deux rapports Force/surface
Chimie minérale	Elément chimique	Conservation lors d'une transformation chimique
Optique géométrique	Réflexion	Egalité de deux angles
Electricité	Courant électrique	Débit des charges électriques
Chimie organique	Chiralité	Molécule non superposable à son image dans un miroir.

S'agissant du concept de « journée », qui de fait renvoie à son évolution au cours d'une année sidérale⁶⁵, celui-ci est lié à quatre invariants. Ceux-ci se repèrent à partir de la rotation de la terre sur elle-même, de la révolution de la Terre autour du soleil, de l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre sur l'écliptique et enfin du maintien de l'orientation de cet axe au cours de la révolution. Chaque concept peut se différencier par le nombre et la nature des invariants qui lui est (sont) associable(s). Si certains concepts peuvent apparaître *suffisants*⁶⁶, d'autres empiètent allègrement sur d'autres terrains disciplinaires. Le concept de *thermorégulation*⁶⁷ est quant à lui lié à deux concepts qui rayonnent sur deux disciplines différentes (les sciences physiques et les sciences de la vie et de la terre).

En outre, comment ne pas lier les concepts d'*énergie* et de *travail*, de *travail* et de *force*, de *force* et de *vecteur*. Sallaberry (1993) pense que les concepts de la physique comme les éléments chimiques entre eux partagent les propriétés d'un système de signes. Les concepts, s'ils peuvent déborder d'un champ disciplinaire, les désenclavent aussi. On voit là toute la portée de l'approche par « champs » de Vergnaud, tant de nombreux concepts trouvent des ramifications intra, voire inter-discipline.

Nous rejoignons l'idée didactique de *trame conceptuelle* (Astolfi 1982, Giordan 2010) pour lesquels un sujet d'étude s'apprécie à travers une *aura conceptuelle* qui allie divers concepts reliant ainsi plusieurs disciplines. « Les concepts ne s'élaborent ni séparément les uns des autres nipar accumulation de sous-concepts »⁶⁸. Prenant le cas de l'appareil digestif, Giordan montre comment un tel sujet d'étude nécessite de travailler des concepts en biologie, physique, chimie, psychogénétique. C'est bel et bien *la logique des concepts*⁶⁹ qui s'impose aux autres logiques, celle de l'action et celle de la pédagogie. Nous allons désormais rendre compte d'une tentative de caractérisation de ce que peut être un concept scientifique.

III-4 Tentative de définition d'un concept

À partir de tous ces ensembles d'enseignements, nous mettons en débat la tentative de caractérisation de Sallaberry⁷⁰, qui, résumant l'ensemble de ses recherches sur la question, fait la proposition suivante : « ...un concept scientifique est *quelque chose* :

- qui n'a pas de référent concret
- qui rassemble (synthétise) tout ce qui évoquait confusément la notion avant qu'il n'advienne et ne permette de désigner précisément,

⁶⁵ Elle correspond à la période orbitale de la Terre

⁶⁶ Dans le sens (figuré) où ils ne rayonnent pas en dehors de leur propre domaine scientifique

⁶⁷ Nous aborderons ce concept plus tard : Cf. *Chap IX (III)*.

⁶⁸ Giordan (2010) p266

⁶⁹ Astolfi – Develay (2005) p54

⁷⁰ Sallaberry (2004) p62

- qui a des bords suffisamment nets, justement, pour que ce qu'il désigne (et ce qu'il ne désigne pas) soit clair
- qui est caractérisé par une structure (**S, I, S**)
- qui permet donc de mieux penser »

Porter désormais un regard vers une définition possible impose d'intégrer de manière privilégiée la place de l'invariant, qui est une véritable pierre angulaire de notre débat. *Penser* concept, nous invite à *penser* invariant(s).

Sallaberry énonce alors : « un concept scientifique est ce qui exprime un⁷¹ invariant, pour un ensemble de situations donné »⁷².

On peut avoir le sentiment que cette approche demeure insuffisamment précise et qu'elle mériterait d'être plus explicite. Toutefois elle revêt l'avantage d'identifier de manière claire et simple ce qui est l'essentiel : le lien étroit, l'intimité supposée (avérée) entre concept et invariant(s) (ce qui pourrait être en sciences physiques et au-delà, un point commun chez ces objets complexes que sont les concepts).

Nous souhaitons désormais aborder de manière plus précise, parce qu'elle se pose comme un objet d'étude incontournable : « la question de l'invariant ».

Nous allons tenter de comprendre pourquoi, et en quoi, l'invariant peut nous être si utile et comment il serait envisageable de le valoriser.

IV- Discussion

IV-1 Vertu et limites de l'analogie

Dans les pratiques pédagogiques qu'il nous a été donné d'observer, l'enseignant trouve parfois dans les analogies, les figures de style, métaphores ou autres, des palliatifs à une impasse intellectuelle, qu'il ne parvient à surmonter avec les éléments de langage qu'il mobilise habituellement.

Doit-on y voir des indices d'une stratégie d'évitement, d'un manque d'expertise de fond, de schèmes cognitifs convenus ? Il semble que ces artifices (les analogies) qui pour certains « fonctionnent », car facilitant l'émergence d'une meilleure compréhension, soient particulièrement répandus. Parfois les notions à divulguer sont si délicates que pour parvenir à leur fin, les « passeurs de savoir » le font transiter à partir de méthodologies « indirectes ».

Ces comportements très utilisés consistent à s'appuyer sur un espace mieux connu, pour nous en faire découvrir un autre, qui celui-là, l'est beaucoup moins.

« C'est la même chose sauf que..... » « C'est un peu comme si..... » « Imagine qu'à la place de..... » sont autant de tournures annonciatrices d'un palliatif qui se veut salvateur.

Ce transfert d'espace, cette analogie du langage, est très souvent un indicateur de présence de concepts ; quand le langage « classique » ne permet plus de se faire comprendre du plus grand nombre, alors il nous faut changer de registre linguistique (inventer de nouveaux signifiants) pour tenter d'y parvenir de nouveau, n'en déplaise à Boileau⁷³.

Pour autant, le syndrome de « l'éponge », cher à Bachelard⁷⁴, est un exemple cinglant des limites⁷⁵ de l'analogie, non qu'elle soit si contestable sur la forme mais parce qu'elle traduit

⁷¹ Nous pouvons considérer en première lecture que l'invariant est ici suggéré comme étant unique ou représentant l'ensemble des invariants associés.

⁷² Sallaberry (2004) p63

⁷³ Boileau N. poète écrivain et critique français (1636-1711). « *Ce que l'on conçoit bien s'énonce clairement, Et les mots pour le dire arrivent aisément.* »

⁷⁴ Bachelard (2004) pp89-100

⁷⁵ On ne peut pas assimiler une analogie à l'ensemble des étapes d'un processus d'apprentissage. Khanfour-Armalé et Le Maréchal (2008) tentent une analogie « naïve et affective » pour ce qu'ils nomment le concept de transformation chimique.

une évidence qui est celle de l'« histoire » de son auteur. Chaque analogie est un acte choisi et relève de sa propre logique, laquelle ne peut toutefois convenir à tous avec certitude.

Travailler sur les apprentissages des concepts revient pour un enseignant, à relever un défi dont l'issue demeure par conséquent particulièrement incertaine.

Outre les obstacles récurrents, qui sont autant de freins à la compréhension tels que les inconscients culturels communs, les relations non acceptées à l'autorité, les structures cognitives sujettes à l'énaction car distribuées, l'appropriation des concepts se heurte à un double obstacle : d'une part le fond, qui s'organise autour d'une zone cognitive de moins en moins accessible et d'autre part la forme, qui butte sur notre capacité à rendre le premier plus lisible.

Dans un tel cas, l'expertise ne suffit plus à penser pouvoir être compris de tous. C'est une frustration, un malaise qui dérange voire déstabilise. Dans ce contexte, le mimétisme s'affirme comme une porte de sortie illusoire, qui certes peut permettre à un individu de pouvoir reproduire, mais qui ne sous-tend pas la compréhension de la logique qui lui a permis cette reproduction. Les analogies sont des outils dérivés qui s'appuient sur un transfert cognitif ; partant d'une sphère de compréhension si ce n'est maîtrisée, pour le moins connue, le sujet devra transposer son savoir dans une nouvelle sphère d'apparence moins accessible. En sciences, les analogies étaient qualifiées de « pauvres » ou de « riches » par Maxwell qui voyait dans ces objets, des figures de style, des métaphores. Les qualificatifs « pauvres-riches » nous renseignent sur des correspondances communes sans pour autant nous donner des indicateurs précis. Qui n'a pas tenté de rapprocher la relation de Charles de la loi d'additivité des tensions⁷⁶ pour construire une analogie mnémotechnique. L'analogie est sémiotique mais parfois sans réel fondement scientifique. En revanche, il existe des objets, les oscillations, qui répondent aux mêmes attributs mathématiques qu'elles soient mécaniques ou électriques. Ici l'analogie est dans la structure-même (elle est génétique) de l'oscillateur : le mouvement périodique. On parlera alors d'analogie structurale⁷⁷; là, l'outil est puissant car nous partons de sa structure pour décliner les mouvements rendant compte de cette loi mathématique⁷⁸. Bien entendu, comme toute analogie, celle-ci a aussi ses propres limites qu'elle trouve dans le phénomène des si jolies oscillations chimiques pour lesquelles une solution change de teinte de manière périodique sans pour autant répondre à la loi évoquée précédemment.

On aime les sciences pour son côté rassurant autant que pour ses zones d'ombre. Nous n'oublierons pas l'analogie fluide/courant électrique, très souvent utilisée dès le collège avec l'utilisation de la loi des nœuds⁷⁹.

IV-2 Le caractère *universel* de l'invariant

Il existe dans toute chose des attributs qui font d'elle des indicateurs de sa reconnaissance, des éléments qui la différencient, la singularisent. Nous nous confrontons en permanence à cette recherche, consciente parfois, inconsciente souvent, des attributs d'un objet, d'un événement.

Le processus cognitif lié à l'appartenance, l'identification, prend sa source dans une logique de comparaison d'ensemble, laquelle rend compte de nombreuses spécificités.

⁷⁶ La somme des vecteurs \vec{AB} et \vec{BC} est égale au vecteur \vec{AC} – La somme des tensions U_{AB} et U_{BC} est égale à la tension U_{AC}

⁷⁷ Sallaberry (1996) p74

⁷⁸ Les structures des oscillations sont construites à partir d'une équation différentielle dont la forme est la suivante : $u''(t) + \omega_0 u'(t) = 0$ où u est la variable, u' et u'' ses dérivées première et seconde, et enfin ω_0 est la pulsation propre du mouvement.

⁷⁹ La somme des courants électriques qui arrivent à un nœud est égale à la somme des courants électriques qui en repartent – La quantité d'eau qui arrive à un embranchement de canalisation est égale à la quantité d'eau qui en repart.

Que ce soit la lecture d'une poésie de Baudelaire, celle d'une écoute musicale de Vivaldi, un évènement quel qu'il soit, se différencie par des éléments de langage qui lui sont propres. Ces éléments singuliers sont autant de signes particuliers qui identifient un auteur, un musicien. N'avez-vous jamais, écouté un extrait musical en vous disant « ce rythme, on dirait du Mozart », observé une toile en disant « ce bleu, je jugerais que c'est du Matisse », vu un défilé de mode en vous écriant « cette insolence, c'est du Gaultier ! ». Cette sensation de *déjà vu*, se construit sur des points communs : des invariants.

Un invariant est un *symptôme* de reconnaissance, il rassure⁸⁰ de par son aspect reproductible, il rassemble autour de lui les objets ayant des attributs communs, imprégnant ainsi notre cortex. Le processus cognitif s'effectue tant par regroupement que par élimination. Par ailleurs, l'identification de la présence d'un invariant est un révélateur qui structure la pensée car il permet d'engager le débat et devient un acteur de la performance intellectuelle.

Si enseigner revient entre autres à convaincre, alors l'invariant est un outil utile pour rendre l'abstrait plus accessible. Ce qui paraît légitime, dans le cadre d'un contexte « hostile » sur le plan pédagogique, est de rechercher les conditions qui permettent de rendre l'effort cognitif plus « apaisé ». « La notion d'invariants est essentielle en science »⁸¹.

La classification phylogénétique du vivant est un exemple singulier qui concentre de très nombreux obstacles dont certains peuvent être adoucis par une approche consciente du lien concept-invariant, ici le lien évolution-caractères⁸².

Nous évoquons des extraits musicaux ou littéraires ; la plupart répondent à des attributs dont la redondance facilite les regroupements singuliers comme ces symptômes auxquels s'attache la médecine et qui lors d'une consultation guide le praticien vers son diagnostic.

Utiliser l'invariant comme bras de levier cognitif, c'est en définitive faire le choix de s'appuyer sur un processus universel. On reconnaît un visage, une voix, une écriture par association-reconnaissance. On identifie un auteur, un artiste par ce qui lui est spécifique, ce qui le démarque des autres.

En sciences physiques, il est très fréquent de mettre en scène des situations didactiques qui favorisent la mise en évidence d'un invariant. Ainsi, les élèves sont souvent invités, après une phase expérimentale, à exploiter les données recueillies pour tracer des courbes dont les deux variables sont proportionnelles, ce qui est censé faciliter la mise en évidence du caractère singulier qui les relie. Dans ces cas de figure, l'invariant se cache derrière la proportionnalité des grandeurs mises en jeu. C'est ainsi que des cohortes d'élèves, en seconde générale, ont découvert la seconde loi⁸³ de Descartes, ou au collège l'empirique loi d'Ohm⁸⁴.

⁸⁰ Nous nous approchons de l'idée de rituel qui est repérable dans toute civilisation par des évènements qui peuvent par exemple être liés à son histoire (politique, religieuse, ...). Nous signalons aussi l'idée de rituel qui est très répandue dans le domaine du sport comme pour exorciser le mauvais sort ou rassurer l'athlète.

⁸¹ Khanfour-Armalé et Le Maréchal (2008)

⁸² On parlera aussi d'attributs morphologiques

⁸³ L'étude consistait à observer le comportement de la lumière au passage de la surface de séparation (dioptré) air-verre d'indices respectifs de réfraction $n(\text{air})$ et $n(\text{verre})$. En demandant de tracer la fonction du sinus de l'angle d'incidence (i) en fonction du sinus de l'angle de réfraction (r), la droite obtenue permettait de mettre en évidence l'invariant : $n(\text{air}) \cdot \sin(i) = n(\text{verre}) \cdot \sin(r)$

⁸⁴ Cette loi permet de relier la résistance (R) d'un conducteur ohmique à l'intensité du courant électrique (I) qui le traverse et à la tension (U) à ses bornes, ce qui s'exprime par la relation $U = R \cdot I$; ainsi sur son domaine de fonctionnement le dipôle présente un rapport U/I constant (R est son invariant).

La science a cette chance d'être convaincue de vivre dans le provisoire. Mais qu'en est-il des invariants qui jalonnent son Histoire ? Prenons le simple exemple de *la masse*. En mécanique Newtonienne, ce concept est lié à un invariant qui représente la quantité de matière de l'objet en question. Or, depuis la théorie de la relativité émise par Einstein, nous savons que pour des grandes vitesses, *la masse* (inerte) dépend de la vitesse à laquelle se meut l'objet. Peut-on encore parler d'invariant dans ce cas ? Pire, s'agissant des collisions d'objets dites à grande vitesse, la quantité de mouvement⁸⁵, elle, ne se conserve plus.

Le propre d'un concept scientifique est qu'il est un outil susceptible d'évolution dans la mesure où il s'appuie sur un, voire plusieurs invariants, dont les contours sont potentiellement remis en question par les découvertes. Si le champ des sciences physiques, comme de nombreux autres, ne permet pas *a priori* de tenir pour loi étatique l'existence d'invariants *absolus*, il demeure que faire émerger la présence de ceux-ci est vraisemblablement de nature à rendre plus accessible, au plus grand nombre, les concepts scientifiques.

L'invariant interroge bien au-delà des habitudes sociales. L'invariant scientifique est *social* tout en étant *asocial*. Il se fonde sur des contours qui se veulent nets ce qui permet au concept de l'être aussi.

Parfois, de faux invariants dits « scientifiques » viennent jouer les troubles-faits. Il s'agit d'invariants non « scientifiques » erronés, et pourtant très installés socialement. Le *social* a alors pris le dessus sur le *scientifique* donnant une fausse lecture du concept associé. C'est le cas pour le concept de *saisons*. Celui-ci est associé en général à un invariant géométrique : une ellipse⁸⁶. La conséquence immédiate est l'association de cette forme à des positions proches et éloignées de la Terre expliquant ainsi les différences de température ressenties au cours de l'année. On voit ici comment une erreur d'approche de l'invariant rend impossible la compréhension scientifique du concept.

En Histoire et Géographie, les concepts de *paysage* ou de *révolution* sont liés à des invariants sur lesquels il est possible de s'accorder. À ce sujet, dans une longue étude (Deleplace, Niclot 2005), il a été montré comment au cours d'un cursus d'apprentissage du collège au lycée, les programmes parvenaient à installer les *bons invariants* chez les élèves. Ceux-ci détiennent des invariants sociaux simplistes au départ : « naturel » ou « esthétique » pour le concept de paysage, « guerre » ou « opposition » pour le concept de révolution. Puis, au fur et à mesure, les sujets transforment leurs points de vue *en une abstraction portée par la généralisation*⁸⁷ et *in fine*, sont capables de « citer un nombre croissant d'attributs sur chacun des concepts »⁸⁸.

En éducation musicale, le concept de *consonance* est celui qui est directement lié à une approche mathématique. En effet, pour définir « ce qui est doux à nos oreilles », il suffit de taper sur un clavier de piano deux notes dont le rapport des fréquences est un nombre particulier⁸⁹ pour obtenir un son agréable à l'écoute.

Nous noterons par ailleurs que ces mêmes rapports sont utilisés en arts plastiques pour définir les proportions idéales en peinture ou en sculpture quand il s'agit de représenter des personnages.

⁸⁵ La quantité de mouvement (p) d'un objet est égale au produit de la masse (m) de l'objet par sa vitesse linéaire (v) ce qui s'écrit $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$

⁸⁶ De très nombreux manuels adoptent la vue en perspective pour décrire la mécanique céleste du trio Soleil-Terre-Lune, transformant la trajectoire quasi-circulaire de la Terre autour du soleil en une forme ovale très elliptique ce qui installe profondément un *faux-invariant* lié à un point de vue particulier de l'observateur.

⁸⁷ Deleplace & Niclot (2005) p7

⁸⁸ Deleplace & Niclot (2005) p150

⁸⁹ Un demi pour une octave, un tiers, pour une tierce.....

Ci-dessous, nous donnons, sur quelques champs disciplinaires, des propositions de liaisons « potentielles » entre invariants et concepts.

Discipline	Concept	Invariant(s)
Education musicale	Consonance	Egalité de rapports de fréquences
Géographie	Paysage ⁹⁰	Matériel Immatériel
Histoire	Révolution ⁴⁹	Changement
Mathématiques	Proportionnalité	Egalité de rapports
Médecine	Diagnostic	Symptôme(s)
Sciences de la vie et de la Terre	Vivant	Système auto poïétique ⁹¹

Il est un domaine, celui du sport, qui n'échappe pas non plus au monde des concepts. Parmi les différents concepts liés à ce champ disciplinaire nous pouvons citer *a minima* celui de *performance*. S'agissant des invariants qui lui seraient associés, il semblerait plus sage de consulter les spécialistes (comme pour les autres disciplines) afin qu'ils en identifient les contours. Pour autant, nous ne résistons pas à la tentation d'avancer quelques pistes possibles qui ne sont là que pour alimenter l'envie et le débat, pour ne pas dire la gourmandise. La *performance* nous paraît conditionnée, à des éléments techniques qui relèvent de la maîtrise de gestes spécifiques, à des éléments matériels adaptés au contexte. Elle ne saurait par ailleurs s'affranchir d'une adaptation psychologique et physique en adéquation avec les exigences de la pratique choisie. Elle nécessiterait une parfaite connaissance et une capacité d'optimisation des règles qui s'appliquent à tous les pratiquants. Ce sont quelques pistes dans lesquelles il est probable de trouver des invariants souvent recherchés avec l'appui vidéo. Nous tentons ici de mettre en lumière le caractère universel de l'invariant s'agissant des liens intimes⁹² qu'ils entretiennent avec de nombreuses disciplines. Nous clôturons ce chapitre par deux questions en débat : celle de la classification des concepts scientifiques et celle du *concept de concept*.

IV-3 Questions en débat

Nous avons abordé la question de la classification des concepts scientifiques dans la première partie de ce chapitre, sans trouver de classement véritablement satisfaisant, et qui puisse, de surcroît satisfaire aux attentes des sciences physiques.

IV-3-1 Grandeurs intensives et extensives

En sciences physiques, il existe de nombreuses grandeurs qui jalonnent les différents domaines de la physique et de la chimie. Toutes ces grandeurs, masse, vitesse, température, concentration molaire, avancement, pour n'en citer que quelques-unes, ne peuvent être associées à un seul domaine donné. Il existe pourtant une différenciation possible qui n'a pas

⁹⁰ (2005) pp7-8

⁹¹ Varela(1989) p45 : « une machine autopoiétique est un système homéostatique...dont l'invariant fondamental est sa propre organisation.. » (Cf. *supra* Chap III (I-4-1))

⁹² L'invariant fait preuve d'infidélité avec les concepts scientifiques – l'invariant est présent dans le critère d'autorégulation d'une structure (quelque chose se conserve malgré la transformation) – l'invariant aide à mieux penser des formes (paradigme gestalt) / d'après Sallaberry (2008) « Structure et invariant, système et invariant » texte diffusé aux membres de l'AFIRSE

été retenue jusqu'ici : celle qui consiste à dissocier les grandeurs *intensives*⁹³ des grandeurs *extensives*⁹⁴. Ne peut-on pas imaginer cette catégorisation comme valide ?

Imaginons une personne faisant du saut à l'élastique de masse M qui atteint en fin de chute la vitesse V . Imaginons une seconde personne de masse M' qui atteint, lors du même saut, la même vitesse V . Que se passera-t-il si ces deux personnes réalisent le saut attachées ensemble ? En première approximation, et compte tenu de la hauteur de chute, les deux personnes n'atteindront pas la vitesse $V' = 2V$ mais V . La vitesse est une grandeur intensive. En revanche, les deux personnes auront une masse $m = M + M'$. La masse, elle, est une grandeur extensive.

Il y a dans cette différenciation une possibilité de classement envisageable. Bien sûr, il faut accepter les approximations que ne tolère pas la thermodynamique. En effet, il y a plus, de deux fois plus d'énergie interne dans deux litres de gasoil que dans un litre !! : la faute aux énergies internes d'interactions⁹⁵. Si l'on accepte de faire abstraction de cette particularité, alors il semblerait acceptable d'utiliser cette dichotomie. Dans le cas contraire, force est de constater qu'il existe des grandeurs extensives non additives. Est-ce la raison pour laquelle aucune proposition aujourd'hui ne fait la promotion de cette classification ? Il est vrai que même la masse n'échappe pas à la pathologie des exceptions : la faute cette fois aux énergies dites de liaisons.

Enfin, une autre ombre vient ternir le tableau. Il n'existe pas d'exclusivité absolue dans les grandeurs ; en effet, il existe des grandeurs qui ne rentrent dans aucune des deux catégories : la grandeur volume au carré (v^2)⁹⁶ par exemple, mais aussi la surface d'un trou noir qui, elle, est proportionnelle au carré de sa masse.

Si l'on part de l'idée qu'une classification ne saurait tolérer de tels outrages, il nous faut renoncer à utiliser l'intensivité et l'extensivité pour classer les concepts scientifiques.

En revanche, sans s'obstiner, ne peut-on pas pousser plus loin l'investigation ? En effet, plutôt que d'opposer les deux classes de grandeurs, il est encore imaginable de valoriser les liens intimes qui les unit ; température / entropie, pression / « force de pression », ou encore quantité de mouvement / vitesse sont des couples de la forme *grandeur intensive / grandeur extensive* où elles sont dites *conjuguées*. Là encore, nous butons sur la « loi des partages » qui refuse les exclusivités. La vitesse peut aussi s'associer à une longueur.

Devant cette apparente impasse à classer les concepts en sciences physiques, une interrogation surgit alors comme une évidence : faut-il classer les concepts ou ne vaudrait-il pas mieux chercher ailleurs notre salut⁹⁷ ? Nous ferons une proposition⁹⁸ dans ce sens, pour tenter de sortir de cette impasse, afin de soulager notre frustration.

⁹³ Considérons un système à l'équilibre (thermodynamique) et homogène (toutes les grandeurs qui caractérisent ce système ont même valeur en tout point du système). En sciences physiques, une variable intensive est une grandeur qui ne dépend pas de la quantité de matière en présence dans le système considéré. Une grandeur physique est dite intensive si et seulement si pour toute partie d'un système homogène sa valeur reste identique et égale à sa valeur pour le système entier. Réciproquement, un système sera dit homogène si toutes les variables intensives y prennent une valeur identique dans toute sous-partie de ce système. Balian(1982)

⁹⁴ Pour la même définition du système que pour les valeurs intensives, en sciences physiques, une variable extensive est une grandeur qui est proportionnelle à la taille du système que cette grandeur caractérise. On dit aussi d'une grandeur G qu'elle est extensive lorsque la somme des valeurs de cette grandeur pour deux systèmes disjoints est égale à la valeur de cette grandeur après réunion des deux systèmes en question. Pour cette raison, on parle parfois de grandeurs additives. Balian (1982)

⁹⁵ En effet l'énergie interne des deux liquides est la somme de trois termes, les énergies internes respectives de chaque litre, auxquelles il faut ajouter un troisième terme celui de l'énergie interne d'interaction. Bref mieux vaut faire le plein !!

⁹⁶ Ceci est vrai également dès que l'on prend une puissance d'une grandeur extensive.

⁹⁷ Comme Propp (folkloriste russe de l'école structuraliste) a pu le mener sur les contes russes pour lesquels aucune classification existante ne le satisfaisait. Il a, sans les nommer explicitement « invariants », identifié des *éléments constants* qui rythment les contes.

IV-3-2 Le concept de concept

Il est difficile de donner une définition généralisable et complète d'un concept. Pourtant, un concept doit être un objet dont les contours sont particulièrement nets. En effet, il ne faut pas qu'il puisse y avoir confusion entre deux concepts. La netteté des bords est l'assurance vie qui permet d'envisager de tisser des liens clairs entre eux. Ceci illégitime l'idée selon laquelle nous gagnerions en lisibilité en imaginant des regroupements de concepts en structure plus vaste (méta concept)⁹⁹. Le corporatisme poussé à outrance ne génère-t-il pas l'aliénation ?

Dans le champ des sciences physiques, les concepts sont exprimés dans un langage mathématique. Il est très fréquent d'observer dans les manuels scolaires des pages en fin de chapitre dédiées à des résumés de cours. Ces documents font la part belle en général aux formules mathématiques et à leur jeu d'unités associées (il serait caricatural d'avancer que seuls ces objets y sont décrits). Toutefois, peut-on imaginer qu'un concept scientifique puisse être réduit à de tels éléments de langage ? Ce serait alors faire l'impasse sur deux histoires.

La première est celle du concept, celle qui à travers les tâtonnements des scientifiques, leurs doutes, leurs réussites, leurs hypothèses, leur intime conviction, aboutit à une formulation empirique, mais fragile pour ne pas dire provisoire (transitoire).

La seconde est celle « réappropriée »¹⁰⁰ par l'élève à qui l'on demande de « revisiter » la première à vitesse vertigineuse. Bien sûr, faire des calculs rassure tout le monde. Toutefois, le cheminement d'appropriation des outils ne saurait être dissocié de celui des outils eux-mêmes. La *conceptogénèse*¹⁰¹ s'effectue aussi avec des R1 et des R2 imparfaites qui imprègnent notre cortex. Ces représentations donnent non seulement du sens au concept mais elles lui sont aussi génétiquement liées car elles recadrent par essais-erreurs, en désambuant parfois, dégivrant souvent. *Il faut comprendre ce que l'on a fait, pour pouvoir comprendre ce que l'on fait.*

Un concept nécessite donc de bien connaître les conditions dans lesquelles il s'est construit, qu'il s'agisse du contexte historique, des expériences réalisées, des choix assumés, des approximations consenties : « ...il n'est pas possiblede faire *l'histoire d'un concept* en ne s'intéressant qu'aux discussions théoriques... »¹⁰². Toutes ces précautions, une fois prises et même si elles semblent indispensables, débouchent sur une approche génétique du concept qui nous laisse sur notre faim. Nous avons pris le coelacanthe¹⁰³ dans nos filets, pu l'observer sous bien des coutures, identifier ces principaux attributs morphologiques, mais nous devons admettre ne pas tout connaître de lui.

Si le *concept du concept* est loin d'être une évidence, nous retiendrons de ce chapitre que les contours donnés aux concepts scientifiques contribuent non seulement à en donner une image de plus en plus nette, mais aussi que, parmi leurs caractéristiques, les invariants nous livrent des pistes didactiques très riches.

Nous arrivons au terme de cette première partie, qui se termine avec le chapitre suivant sur le terrain épistémologique. Nous dressons en son sein, les différents éléments qui sont le socle de notre recherche mais aussi de notre éthique.

⁹⁸ Cf. *infra* Chap VIII

⁹⁹ Wittgenstien (1961) p157

¹⁰⁰ Sallaberry et Martinand préféreraient « réinventer » pour l'un « inventer » pour l'autre.

¹⁰¹ Nous proposons ce terme pour identifier les étapes qui permettent de construire durablement un concept scientifique

¹⁰² Martinand (1986) p168

¹⁰³ Seule espèce du groupe des *actinistiens*, pêché en 1938 en Afrique du Sud, alors qu'il n'était connu que sous forme fossile.

Chapitre V Questions d'ordre épistémologique

Synthèse de ce chapitre

Nous sommes convaincus que les sujets interfèrent avec leur représentation. Nous nous ancrions profondément dans une « logique constructiviste » assumée et réfutons les attributs du *déterminisme* tant le paramètre *sujet-objet* est ici prédominant. Nous considérons par ailleurs que la complexité de notre contexte nécessite d'appréhender cette recherche de manière particulière. En cela, la proposition de structure (S,I,S) de Vergnaud nous apparaît susceptible de répondre à un tel contexte. En outre, l'élaboration des supports paraît essentielle pour se donner les moyens de pouvoir tenter d'observer les indices d'un cheminement individuel. Pour cela, il nous a fallu inventer de nouveaux outils, au plus près de la situation (entre autre « décortiquer » l'invariant et le concept d'élément chimique) pour en révéler toutes les subtilités. Enfin, notre position de « chercheur » nous impose prudence et humilité car nous naviguons au sein du monde des représentations, celui que Sallaberry se plaît à définir comme « le monde des inférences ».

Désormais nous prenons un peu de recul, rendu nécessaire par la nature des objets que nous interrogeons : les représentations des élèves. Il apparaît incontournable de cerner les contours de ces objets d'un point de vue épistémologique à partir desquels nous allons, dans les chapitres suivants, construire notre recherche.

D'un côté, on peut être tenté par cette idée qui consiste à clamer l'identité des choses visibles. D'un autre, on peut aussi penser ces mêmes choses plus complexes.

Entre positivisme et constructivisme, l'épistémologie, doit-elle renvoyer dos à dos ces deux approches, ces deux courants ? Nous allons mettre en lumière la réflexion de Le Moigne (1995) sur ce point, en reprenant les grandes lignes directrices qu'il développe dans son ouvrage ô combien essentiel : « Les épistémologies constructivistes ». Quant aux représentations, même si leur complexité s'impose d'elle-même, nous aborderons comment il nous est apparu envisageable de la prendre en considération dans le cadre de notre étude sur le concept de l'élément chimique.

I- Le recadrage de Le Moigne

Le Moigne (1995) pose de nouveau, dès le départ, les trois questions empiriques qui ont précédé l'avènement de l'épistémologie :

« Q1 : Qu'est-ce-que la connaissance (la question gnoséologique) ?
Q2 : Comment est-elle constituée ou engendrée (la question méthodologique) ?
Q3 : Comment apprécier sa valeur ou sa validité (la question éthique) ? »¹

Ces trois questions qui sont fondatrices de l'épistémologie et du statut de la connaissance peuvent être résumées par : Quoi ? Comment ? et Pourquoi ?

À cet égard, Le Moigne porte un jugement sans concession sur les pratiques institutionnelles au sein du monde de la recherche, pointant du doigt les dépenses inconsidérées, vides de sens, qui ne produisent pas de connaissances valables, témoignages d'une inculture épistémologique qui s'affranchit des questions de validité de l'énoncé produit. Difficile d'être plus cinglant.

Mais son idée principale n'est pas de porter la critique de manière inconsidérée ou d'opposer les épistémologies entre elles, bien au contraire : son ambition est de montrer ce qui les différencie, et au final, comment concevoir de les rassembler, de les (re)concilier.

I-1 Épistémologies positiviste et constructiviste

Les sciences expérimentales s'appuient fortement sur les «objets», ceux que l'on peut voir, toucher et manipuler et qui font de chaque génération d'élèves des sujets attentifs et à l'écoute de leur professeur, tant le désir de se confronter au concret, au réel, est grand. C'est ainsi que le père spirituel et fondateur du positivisme, Auguste Comte, indiquait que le mot *positif* désignait le réel. Quel que soit le choix du matériel utilisé, celui-ci présente des invariants solides qui s'offrent à tous comme autant d'évidences. Si je distribue des globes terrestres à mes étudiants en travaux dirigés, tous peuvent observer et appréhender le même « concret » : l'objet-globe, qui est alors unanimement partagé (même socle, même forme sphérique, même inclinaison sur son axe de rotation, mêmes aspects iconographiques.....). Il n'y a là que peu de place pour les désaccords... juste pour la mauvaise foi !

[Vive les sciences dures !!]

¹ Le Moigne (1995) p6

En revanche, si je fais appel à l'objet-globe, que je le convoque dans mon discours, comment puis-je être certain que tous les étudiants se représentent le même objet ? Comment savoir quels sont les cheminements que chacun va mobiliser pour construire ses représentations ? Certains vont « imaginer » l'objet-globe, celui qu'ils avaient chez eux et qui éclairait leur bureau, d'autres se référeront à celui manipulé comme taille-crayon, et certains enfin penseront planisphère en deux dimensions et que sais-je encore ! Et quand bien même la majorité verrait émerger un objet « similaire » qu'en serai-t-il de son utilisation mentale ? On peut prétendre prévoir la manière dont l'objet peut être utilisé pour expliquer, par exemple, l'alternance des journées et des nuits (cette mécanique céleste étant scientifiquement connue) mais la manière dont il le sera, les opérations qu'il va subir, les cartographies neurologiques qui seront mobilisées ne relèvent plus du prédictif. À celles et ceux qui pourraient imaginer que l'anticipation est une science exacte, nous disons sans ironie aucune :
[Vive les sciences souples !!]

Le Moigne (1995) précise qu'il existe un grand nombre de courants épistémologiques relevant du positivisme de telle sorte que l'on peut parler de méta-paradigme de l'épistémologie (post positivisme – néo-réalisme – naturalisme – empirique...) auquel viennent s'ajouter désormais les épistémologies constructivistes.

Il précise qu'une épistémologie se doit d'être couplée à un contrat social : on doit pouvoir l'enseigner, la développer voire l'institutionnaliser. Dans le cas contraire on bascule dans l'arbitraire, dans le scientisme. Afin de mieux comprendre comment appréhender épistémologies positiviste et constructiviste, Le Moigne propose de les comparer point par point dans leur dimension *gnoséologique*, et *méthodologique*.

I-2 Approche comparative

Nous proposons de résumer, avant de l'illustrer, l'idée de Le Moigne par un tableau² qui met en regard les deux épistémologies positiviste et constructiviste dans leur dimension gnoséologique et méthodologique lesquelles s'articulent respectivement autour de la nature de deux hypothèses et de deux principes.

	Positivisme	Constructivisme
<i>Gnoséologie</i>	<i>Nature de l'hypothèse</i>	
	ontologique	phénoménologique
	déterministe	téléologique
<i>Méthodologie</i>	<i>Nature du principe</i>	
	de modélisation analytique	de modélisation systémique
	de raison suffisante	d'action intelligente

Nous allons mettre en regard chaque hypothèse et chaque principe et ce, pour chaque épistémologie dans leur dimension *gnoséologique* et *méthodologique*.

I-2-1 Dimension gnoséologique

a/ Mises en regard des hypothèses *ontologiques* et *phénoménologiques*

-L'hypothèse *ontologique* porte la signature de la réalité qui existe, celle qui est essentielle. Cette réalité ne dépend pas de l'observateur qui en fait la description. Le discours (logos) qui en fait la promotion regroupe l'ensemble de ce qui relève du « connaître », même s'il semble

² Ce tableau s'inspire de celui proposé par Sallaberry (2004) p156

admis qu'il puisse exister quelques variables dans les apparences et les comportements. Ces imperfections ne remettent pas en cause le fond selon lequel « l'existence de son essence »³ n'est liée ni à l'expérience ni à celui qui observe. Le Moigne métaphore cette position, en assimilant la réalité à une asymptote, et l'hypothèse à une courbe, laquelle en est (à l'infini) pour ainsi dire confondue. Il faut toutefois préciser que certaines approches de la réalité acceptent d'exclure, de la réalité connaissable, des territoires qu'elles jugent hostiles, comme ceux de l'homme ou de l'esprit humain, leur conférant ainsi une meilleure vérifiabilité ; voilà des symptômes d'une quête de respectabilité et de légitimité, qui ne peut pas pour autant masquer l'aspect cartésien du « clair et net »⁴.

-L'hypothèse *phénoménologique*, elle, fait la part belle à l'interaction. C'est Piaget(1926) qui proclame que l'intelligence est assujettie à une interaction sujet-objet, la connaissance de fait est liée à une action, à un processus actif. En définitive, il y a non séparabilité entre la connaissance d'une part et l'intelligence qui la produit. Quel bonheur de pouvoir induire le doute et l'ambiguïté !! Ainsi l'hypothèse *phénoménologique* se distingue par trois caractéristiques de l'expérience connaissable, toutes liées à la cognition : l'irréversibilité, la dialogique et la récursivité.

La première pose l'idée que l'action ne peut être atemporelle dans la mesure où elle s'inscrit dans la durée. La seconde porte l'idée indirecte de la *représentation* que le sujet associe à ses propres perceptions du réel. Enfin, la troisième, promeut l'interdépendance entre sujet et connaissance. Le sujet transforme la connaissance qui le transforme en retour.

b/ Mises en regard des hypothèses *déterministes* et *téléologiques*

-L'hypothèse *déterministe* apparaît comme conditionnant la formulation de l'*ontologisme*. En effet, si l'on peut expliquer (*déterminisme*) de manière unique la réalité de la connaissance, cela viendrait du fait que l'on peut la décrire (*ontologisme*) de manière unique. Descartes (1637)⁵ proclame à qui veut l'entendre que chaque effet de la réalité est produit par quelque cause, sous condition de conserver le bon ordre, lequel permet de construire un cheminement déductif du début à la fin, et qu'ainsi, l'homme se rend le maître de la nature et peut en prendre possession. Le Moigne, lui, avance que si Kepler n'avait pas été « habité » par le *déterminisme*, il ne se serait pas obstiné à rechercher des lois susceptibles d'expliquer les comportements invariants des planètes. Le *déterminisme* a ce côté rassurant mais son caractère « prévisible » ne laisse que peu d'espace à la créativité. Il y a là une évidente incompatibilité avec le monde du sport. Celui-ci ne raconte pas l'histoire à l'avance, il nous offre son essence : *le suspense*, les retournements de situations, bref tout ce qui refuse l'inéluctable et qui donne le frisson en vous faisant lever de votre siège. Bienvenue dans le monde de l'ovalie (celui du rugby) qui défie celui décrit dans « Les temps modernes »⁶.

Nous pouvons observer l'empreinte du *déterminisme* par ce foisonnement de préceptes : « les mêmes causes engendrent les mêmes effets » - « il n'y a pas d'effet sans cause ou de fumée sans feu »⁷ lesquels jalonnent les manuels scolaires et entretiennent sa vivacité.

-L'hypothèse *téléologique* se référant à l'hypothèse *phénoménologique*, interroge l'intention du sujet. Plutôt que d'avancer l'idée de causalité (la fin est justifiée par les moyens), l'idée de « causes finales » prédomine. Sallaberry image la situation en avançant que « quelque chose est perçu comme poursuivant un but »⁸. Peut-on croire qu'un individu puisse être soumis à un

³ Le Moigne (1995) p22

⁴ Le Moigne (1995) p76

⁵ Descartes, dans le discours de la méthode (sixième partie).

⁶ Chaplin (1936) ; ce film met en scène, entre autres, les aspects répétitifs et inexorables du travail « à la chaîne »

⁷ Le Moigne (1995) p26

⁸ Sallaberry (2004) p156

cheminement cognitif génétiquement contraint en toutes situations ? Un sujet ne peut-il pas se voir douer d'une aptitude auto-finalisante, faisant alors la part belle à la fonction ?

Ces deux approches sont chronologiquement opposées. La première (celle des causes probables) remonte le temps du futur vers le passé quand la seconde (celle des fins plausibles) se meut du présent vers l'avenir. Cette dernière refuse, réfute l'idée selon laquelle tout est joué à l'avance. L'approche *téléologique* est double : elle peut être *faible* ou *forte*.

➤ Dans le cas où elle est *faible*, malgré la différenciation des présents, les futurs convergent vers un évènement unique. Quelle que soit la température extérieure, le thermostat dans l'habitat régule la température intérieure ; pour autant les variations des températures observées au cours du temps (celui qui passe) peuvent être très différentes d'un habitat à un autre.

➤ Dans le cas où elle est *forte*, des présents similaires peuvent aboutir à des futurs très différents. Ces futurs sont élaborées de manière « endogène par le système cognitif lui-même »⁹. Il y a dans l'exemple des caprices de la météorologie quelque chose qui s'apparente à la *téléologie* forte : comme si chaque sujet détenteur d'une condition initiale qui lui est propre pouvait conduire des raisonnements si différents qu'ils aboutissent à des considérations potentiellement opposées ou pour le moins très divergentes. Une théorie du chaos¹⁰ qui mettrait K.O¹¹ l'approche déterministe par effet papillon¹² (Le Moigne parle de « chaos déterministe »). Notre incapacité à établir une loi dont les manifestations s'imposent à nous ne doit pas irrémédiablement remettre en cause son existence. Le *déterminisme* causaliste devient statistique, réversible, global, poussé par la physique relativiste¹³ et la thermodynamique dans ses derniers retranchements. On peut alors voir dans la physique probabiliste de l'atome, un exemple dérangeant pour les partisans de la première hypothèse, qui auront vraisemblablement du mal à accepter qu'un nuage de points puisse représenter une même cause et que l'utilisation de la régression linéaire, bien que rassurante n'occulte que difficilement, le caractère capricieux et aléatoire d'une désactivation radioactive¹⁴.

Dans leur ouvrage « La nouvelle alliance », Ilya Prigorine et Isabelle Stengers (1993) mettent en lumière ce qui aura révolutionné le monde scientifique au XX^e siècle. La mécanique classique jusqu'ici dominante¹⁵ allait devoir se confronter à l'inacceptable : l'avènement de la thermodynamique. Cette nouvelle physique introduit avec force *la notion d'incertitude*. Elle débouche sur la mécanique quantique et la relativité. Il y a alors deux manières de considérer l'incertitude.

➤ La première (conception déterministe) consiste à vouloir tout rechercher pour tout connaître, afin de s'assurer du résultat avec précision et ainsi afficher des certitudes, ce qui permet du même coup de se débarrasser du passager clandestin « incertitude ». En augmentant la performance et la fiabilité des appareils de mesures, la mesure doit pouvoir devenir « exacte » et indépendante du système qui la traque.

➤ La seconde (conception constructiviste) consiste à accepter le principe même d'incertitude, en partant de l'idée que l'expérience scientifique est inexorablement liée à son propre

⁹ Le Moigne (1995) p82

¹⁰ La théorie du chaos traite des systèmes dynamiques qui ont la particularité d'être très sensibles aux conditions initiales et en font des phénomènes instables non prédictibles sur le long terme.

¹¹ Knock out (expression utilisée en boxe pour notifier les conditions brutales de la fin d'un combat)

¹² « Un battement d'ailes de papillon changeant les conditions initiales localement serait la cause d'un ouragan à l'autre bout de la planète ». Les courbes mathématiques qui « traduisent » ces évènements sont des fractales.

¹³ La mécanique quantique illustrée par l'équation de Schrödinger (laquelle permet d'obtenir la représentation des orbitales atomiques).

¹⁴ Les phénomènes radioactifs se traduisent par des désactivations qui oscillent autour d'une moyenne

¹⁵ Ilya Prigorine et Isabelle Stengers (1993) p44) : « Deux sciences pour un seul monde... »

environnement. Toute mesure est une interaction. Ainsi, Niels Bohr, évoquant la constante de Planck, disait que celle-ci « ..définit comme non décomposable l'interaction entre un système quantique et un instrument de mesure...la réponse enregistrée ne nous permet pas de découvrir une réalité donnée »¹⁶. La prudence s'impose à nous comme une évidence. Si l'on pousse cette réflexion jusqu'à proposer une analogie entre *nombre quantique* et *représentation*, alors cette dernière « caractérise le système dans l'état propre dans lequel nous avons choisi de le produire et de le décrire, en lui posant expérimentalement telle question et non telle autre »¹⁷.

I-2-2 Dimension méthodologique

a/ Mises en regard des principes de *modélisation analytique* et *systémique*

-Le principe de *modélisation analytique*¹⁸ revendique l'idée selon laquelle, toute connaissance, même compliquée, peut être décortiquée en objets plus simples (comme les pièces d'un puzzle ; encore ne faut-il pas perdre de pièces sous peine d'être taxé de réductionniste). Le principe est frappé d'un bon sentiment : rendre plus lisible le tout grâce à la compréhension de ses différentes parties. On passe du macroscopique au microscopique par décompositions successives. Toutefois, cet affichage apparaît comme une généralité formelle dans la mesure où il n'est pas spécifié comment il nous faut réaliser cette décomposition.

Doit-on comprendre que tout est permis tant que cela fonctionne ? Si holisme et individualisme jouent sur des registres antagonistes (le tout, pour expliquer les parties qui le composent, pour le premier) le *déterminisme* doit clarifier le principe de la découpe s'il veut prétendre nourrir une épistémologie universelle.

-Le principe de *modélisation systémique* installe l'idée selon laquelle la complexité peut être modélisée¹⁹. Il est le digne héritier de l'*ingénium*²⁰ (ingéniosité cognitive) qui s'emploie à décrire une action contextualisée. Etant en difficulté au départ pour s'appuyer sur des éléments solides qui soient susceptibles de rendre lisible ce qu'elle voulait enseigner, la *modélisation systémique* se tourne vers des paradigmes comme ceux de la complexité²¹, de l'action intelligente²². Dans un même temps, on assiste à un « donnant-donnant » quand de nouvelles sciences émergentes (écologie - immunologie - sciences de la formation - ...) se réclament de la *modélisation systémique* sans se préoccuper outre mesure de leur appartenance épistémologique. Il y a co-émergence, en quelque sorte, entre deux mondes qui recherchent de la légitimité. Les questions qu'ils (se) posent ne sont pas fondamentalement nouvelles dans la mesure où Quintilien²³ les portait déjà en son temps ; ces questions peuvent être actualisées par les locutions suivantes : « Quoi ? » - « Faisant et devenant quoi ? » - « Pourquoi ? » - « Dans quoi ? ». Ce qui se traduit enfin par « Quel projet ? » - « Quelles actions ou fonctions ? »²⁴. Si l'on part de l'idée qu'il est plus judicieux de s'attarder sur sa fonction plutôt que sur l'objet lui-même, « de privilégier l'acte sur la chose », passant de

¹⁶ Ilya Prigorine et Isabelle Stengers (1993) p 311

¹⁷ Ilya Prigorine et Isabelle Stengers (1993) p 312

¹⁸ C'est Aristote qui évoque le principe de l'Analytique.

¹⁹ Cf. *infra*. Chap V (II)

²⁰ *Ingénium* se décompose en *Inventio* (qui vient de la rhétorique) et *Disegno* (dessin du dessein)

²¹ Morin (1986) « Le cerveau est plus qu'un système complexe ; c'est un complexe de systèmes complexes » p97

²² Simon (2004) *Les sciences de l'artificiel* où il développe l'idée selon laquelle la complexité est arborescente. C'est de l'arborescence même que peut naître la faculté d'émergence et l'action intelligente pp319-371

²³ *Quis, quid, ubi, quibus auxiliis, cur, quomodo, quando* : « Qui, quoi, où, avec quels moyens, pourquoi, comment, quand ? » Site Wikipédia consulté le 22/03/2012

²⁴ Le Moigne (1995) p85

l'interrogation « De quoi c'est fait ? » à « Qu'est-ce-que ça fait ? pourquoi ? »²⁵, alors on entre de plain-pied dans les considérations qui fondent le principe de la *modélisation systémique*.

b/ Mises en regard des principes de *raison suffisante* et d'*action intelligente*

-Le principe de *raison suffisante* s'apparente à une logique de type déductive. Elle est utilisée de manière très prégnante dans l'enseignement scientifique et revendique le statut de *garde-fou* contre toute tentation vers l'*onirisme* pour lequel rêves et réalité font table commune.

Ce principe permet de mettre à jour la réalité par une chaîne de liens causaux, qui devient alors une sorte de négatif photographique de la réalité elle-même.

Ceci se traduit par la chaîne événementielle la plus simple qui soit : A étant la cause de B, B est causé par A, ainsi A est la *raison suffisante* (l'explication certaine) de B²⁶.

Nous sommes dans une logique stéréotypée du tout prédictif qui rassure sans doute et peut revendiquer sa reproductibilité. Ce principe peut être perçu par certains comme un socle solide sur lequel on peut bâtir des certitudes, un outil qui nous protège de l'imprévisible, un hyper-stabilisateur qui soulage et entretient un sentiment de sérénité pour ne pas dire de plénitude.

-Le principe d'*action intelligente* (préféré au principe de *raison intelligente*, lequel constituerait de l'ambiguïté entre fonction cognitive - *raison* - d'une part et caractéristique de sa production - *intelligente* - d'autre part) explore et construit les représentations symboliques des connaissances que le sujet traite. Le sujet, pour résoudre un problème, va inventer une action qui aura pour finalité de restaurer de la consonance, après qu'il ait perçu de la dissonance entre ses comportements et ses projets. Il est doué d'une capacité à produire des actions adaptées, à tâtonner, à progresser en passant par des étapes intermédiaires qui petit à petit s'affinent. Dans un tel contexte, le sujet raisonne de manière intuitive (abduction), en probabilisant ses réponses (rétrodiction), en transformant ses propres connaissances (transduction). Le statut même de la connaissance est remis en question passant du « nécessaire » au « possible ». Choix est fait de privilégier l'argumentation (devant la démonstration) laquelle est rendue intelligible car reproductible.

Enfin, Le Moigne conclut en reprenant à son compte l'expression de Grize J-B²⁷ qui préfère l'expression C.Q.F.A (Ce qu'il fallait argumenter) à l'expression C.Q.F.D (Ce qu'il fallait démontrer). Privilégier l'argumentation à la démonstration : il y a là, comme un parfum de déjà vu²⁸ avec l'idée selon laquelle l'activité cognitive installe durablement la connaissance dès lors qu'elle privilégie la « mécanique neurologique » des raisonnements.

Le Moigne en abordant les épistémologies constructivistes tente de concilier « deux frères ennemis », d'un côté l'épistémologie *constructiviste* et de l'autre l'épistémologie *positiviste*. Il procède à un **véritable recadrage** en considérant la première comme englobant la seconde. On passerait de l'une à l'autre dès que le paramètre « sujet-objet » deviendrait négligeable. Tout comme la mécanique relativiste devient classique dès que le paramètre vitesse est réduit²⁹. En tant que scientifique, la position « *positiviste* » semble convenir tant que l'on reste sur des objets désinervés ; en revanche, seule la position « *constructiviste* » est tenable dès que l'on se préoccupe des représentations (elles sont le corps de nos corpus). Ainsi nous sommes sur la lignée *phénoménologique* non pas par choix, mais par simple réalisme.

²⁵ Le Moigne (1995) p86

²⁶ Le Moigne (1995) p32

²⁷ Instigateur de la logique naturelle,

²⁸ Cf. *supra*. Chap I (II) où Léna prône le raisonnement comme ambition commune.

²⁹ Exemple cité par Sallaberry (2004) p157

II- Méthode et réflexion sur la méthode

Nous sommes engagés sur un travail de recherche auprès d'élèves qui découvrent le second degré. L'arrivée au lycée est une étape contrastée pour ces élèves qui voient s'éloigner avec le collège une partie de leur vie scolaire, parfois longue et génératrice de lassitude. L'arrivée au lycée est alors considérée comme une nouvelle étape qui s'accompagne d'un double changement de statut : celui d'appartenir à une communauté de pré-adulte et celui d'être, au sein de cette communauté, les « novices », alors qu'ils avaient l'année précédente au collège une position d'« initiés ». Tout est à (re)apprendre et à (re)construire. De manière générale, le lycée a ses propres exigences qui impactent l'évolution des comportements des élèves qui se construit parfois au-delà du premier trimestre. Il faut s'adapter à cette obligation de devoir « s'expliquer » sous peine de ne pas voir ses efforts reconnus. Les enseignants sont les témoins de ces évolutions plus ou moins rapides qui contraignent les sujets à construire de manière prégnante des R2. Afin de caricaturer à outrance : « il ne suffit plus d'apprendre ou de restituer, mais il faut convaincre que l'on a compris ».

Cela explique la raison pour laquelle notre intérêt se porte sur les objets complexes que sont les concepts scientifiques. En seconde générale, au lycée, notre difficulté est donc de tenter d'observer des comportements cognitifs chez des sujets qui se confrontent à une exigence plus forte que celle à laquelle ils étaient jusqu'ici habitués et qu'ils apprivoisent petit à petit.

Notre recherche s'effectue dans cet environnement avec quarante-quatre élèves venant d'horizons très différents et pour autant soumis à la même contrainte : celle des concepts scientifiques. En outre, nous nous appuyons sur les représentations des élèves qui traduisent une réflexion en cours d'élaboration et ne pourraient être tenues pour une vérité absolue. Par ailleurs, nous montrerons comment notre réflexion sur la méthode utilisée nous a amenés à reprendre nos idées pour les pousser plus avant, refusant ainsi les évidences apparentes, recherchant la contradiction au risque de remettre en cause nos propres convictions.

Nous reviendrons, dans les deux chapitres suivants, sur ces différentes approches et complexités. Pour l'heure, nous allons décrire la méthode employée.

II-1 La méthode retenue

II-1-1 Retour sur le concept d'élément chimique

Mettre en regard, d'une part, le cadrage théorique de l'élément chimique porté par Martinand (1986) et la lecture des programmes de seconde générale³⁰ et, d'autre part, les propositions éditoriales via les manuels scolaires destinés aux élèves est une nécessité. Dès la programmation de ce concept au collège (en 5^e), à la fin des années 70, sont apparues des confusions importantes entre ce qui relève de la définition du concept et ce qui relève de la définition d'un élément chimique : sa caractérisation. Martinand (1986) nous éclaire à ce sujet en posant comme préalable que le concept d'élément chimique se définit à travers les transactions électroniques lors des transformations chimiques. Il ne saurait donc être question d'avoir recours à la structure de la matière (nombre de protons) pour définir le concept. Pour autant s'intéresser au noyau informe sur la caractérisation d'un élément chimique donné et confère au concept une autre lisibilité.

Cela étant, force est de constater qu'il persiste (au mieux !) une ambiguïté entre **définir** et **caractériser**. Ce piège peut être entre autres révélé par l'utilisation à mauvais escient des deux verbes précédents (caractériser à la place de définir). Les approches « chimiques » et « structurales » sont complémentaires voire indispensables pour prétendre « tenir » le concept d'élément chimique. Toutefois, la première relève de la définition du concept quand la seconde aborde la caractérisation d'un élément particulier. Alors que le concept d'élément

³⁰ BO spécial n°4 du 29 avril 2010

chimique « appartient » aux domaines des électrons, il se trouve très souvent « propulsé » vers celui des protons et de la physique nucléaire !!

Nous retiendrons donc, s'agissant des définitions du concept d'élément chimique et d'un élément chimique, les formulations suivantes :

Définition du concept d'élément chimique : « L'élément chimique est ce qui se conserve lors d'une transformation chimique »

Définition d'un élément chimique (ce qui le caractérise) IUPAC³¹ : « Un élément chimique est caractérisé par son numéro atomique (Z) ou nombre de protons »

La lecture comparée des deux derniers programmes de sciences physiques en seconde générale (1999 et 2010) sur le concept d'élément chimique interroge la manière dont celui-ci est proposé aux enseignants. Voici (ci-dessous) ce que l'on peut lire à ce sujet dans l'ancien programme (1999) et l'actuel (2010)³².

PROGRAMME 1999		PROGRAMME 2010	
CONTENUS	CONNAISSANCES ET SAVOIR-FAIRE EXIGIBLES	NOTIONS ET CONTENUS	COMPETENCES ATTENDUES
<i>L'élément chimique.</i> Caractérisation de l' <u>élément</u> par son numéro atomique et son symbole. Conservation de <i>l'élément</i> au cours des transformations chimiques.	Connaître le symbole de quelques <u>éléments</u> . Savoir que le numéro atomique caractérise l' <u>élément</u> . Interpréter une suite de transformations chimiques en termes de conservation d'un <u>élément</u> .	<u>Éléments</u> chimiques. Caractérisation de l' <u>élément</u> par son numéro atomique et son symbole.	Connaître le symbole de quelques <u>éléments</u> . Savoir que le numéro atomique caractérise l' <u>élément</u> . Pratiquer une démarche expérimentale pour vérifier la conservation des <i>éléments</i> au cours d'une réaction chimique.

On observe une ambiguïté sur l'utilisation du terme « élément » qui est parfois utilisé pour désigner le concept d'élément chimique (en italique dans le tableau) et parfois pour désigner un élément chimique particulier (souligné dans le tableau).

Nous observons que pour les nouveaux programmes, la définition n'apparaît plus dans les *notions et contenus*. Par ailleurs, dans les *compétences* attendues, il est suggéré d'utiliser une expérimentation pour *vérifier* la conservation des éléments – d'une part, le volet transformationnel n'apparaît plus et, d'autre part, l'expérience vient témoigner d'un savoir établi.

Nous regrettons profondément cette approche didactique « soumise » (on expérimente pour vérifier et non pas pour découvrir), et l'approximation sémantique de fond s'agissant de la définition du concept. La définition qui caractérise un élément, elle, demeure correctement exprimée.

Quand Martinand dit³³ avec une formule tranchée - « Je n'ai jamais vu un enseignant aborder correctement ce concept » - on peut être un peu surpris. Mais il faut bien se rendre à l'évidence qu'il n'a malheureusement peut-être pas tout à fait tort !! Et ce ne sont pas les textes dits « officiels » qui semblent être en mesure d'améliorer son constat et de pouvoir le contredire.

³¹ La première définition donnée par l'I.U.P.A.C (International Union of Pure and Applied Chemistry) est la suivante : « A species of atoms; all atoms with the same number of protons in the atomic nucleus . »

³² BO hors-série du 12 août 1999 et BO spécial n°4 du 29 avril 2010

³³ A l'occasion du congrès international de l'AFIRSE en juin 2011 à l'issue de ma communication, Martinand m'a définitivement convaincu (et fait réaliser par la même occasion quelle avait été mon erreur d'appréciation toutes mes années d'enseignement au lycée...)

II-1-2 L'exploitation de la structure (S, I, S)³⁴ de Vergnaud

Afin de pouvoir observer comment les élèves appréhendaient le concept de l'élément chimique, nous avons choisi d'utiliser la structure proposée par Vergnaud. Cette structure dite (S, I, S) nous semble tout à fait convenir à l'apprentissage des concepts en sciences physiques. Nous identifions maintenant au sein de cette structure les caractéristiques de notre contexte de travail sur le concept de l'élément chimique.

a/ **S** : ensemble des situations qui donnent du sens au concept.

Nous nous appuyons sur une proposition ancienne³⁵ de Martinand et Viovy qui ont imaginé un protocole expérimental basé sur une boucle réactionnelle mettant en scène l'élément cuivre. L'ensemble des situations correspond aux différentes expériences qui sont soumises aux élèves pendant le protocole³⁶ expérimental.

b/ **I** : ensemble des invariants opératoires qui sont sous-jacents au traitement de ces situations par le sujet.

Nous identifions pour le concept d'élément chimique un invariant que nous qualifierons d'invariant *par conservation-transformation*. Cet invariant porte l'idée forte et essentielle de « continuité de présence ». Son caractère opératoire tient entre autres dans le fait que chaque élève devra construire cette continuité par un cheminement cognitif qui est incontournable, mais dont les méandres demeurent spécifiques de chacun. L'invariant est opératoire³⁷ dans le sens où il sert dans l'action et où il constitue la spécificité de l'action elle-même. Il faut que le sujet construise une véritable démarche cognitive pour, que dans cet ensemble de substances chimiques, il perçoive que certaines d'entre elles abritent l'invariant. Avoir identifié les différentes substances mises en jeu ne signifie pas avoir repéré l'invariant.

c/ **S** : ensemble des signifiants (ou symbolisations) qui permettent de représenter les invariants, les situations, les procédures de traitement.

Dans notre cas, travailler sur des transformations chimiques invite, suggère d'utiliser des outils lexicaux spécifiques comme les symboles des espèces chimiques ou les écritures des transformations. Par ailleurs, le monde de la chimie est jalonné d'une sémantique qui lui est propre et de signifiants qui permettent de la caractériser. Le protocole choisi traverse entre autres les domaines des états de la matière, des réactions particulières comme les précipitations. Les bulles qui se forment deviennent des *effervescences*, le solide qui se forme devient un *précipité*, la « fumée »³⁸ qui se dégage devient de *fines gouttelettes en suspension dans l'air*, les traces rougeâtres sur le tube à essai représentent un *dépôt* de cuivre. Enfin, les élèves ont été invités à rendre compte de leurs représentations dans un bilan³⁹ très « libre », ce qui s'est traduit par des schématisations et des croquis très divers.

II-1-3 L'exploitation de la catégorisation⁴⁰ R1/R2/R3

Nous caractérisons des processus. Sallaberry a caractérisé des processus sur d'autres corpus. Utiliser sa caractérisation n'a rien d'étonnant ou d'arbitraire. Comment percevoir l'invisible par voie directe ? Si l'on souhaite observer des comportements cognitifs sans ouvrir la boîte crânienne, sans marqueur ou traceur radioactif, sans électrodes et fils de connexions⁴¹, alors il

³⁴ Cf. *supra* Chap IV (II-1)

³⁵ Martinand J-L. & Viovy R. (1979) pp 878-884

³⁶ Cf. *infra* Chap VI (I-2)

³⁷ Si pour Piaget une opération est assimilable à une action et sa réversibilité, en sciences physiques, les lois fondamentales de la thermodynamique ne peuvent aboutir à une telle définition dans la mesure où toute opération s'accompagne d'une « dépense énergétique ».

³⁸ Ce terme est impropre car la fumée ne peut être assimilée à l'état liquide du corps pur eau.

³⁹ Cf. *infra* Chap VI (I-3)

⁴⁰ Cf. *supra* Chap III (II-3)

⁴¹ Nous ne postulons pas ici que les processus puissent être « observables » par de tels moyens

faut se résigner à utiliser l'outil dont on pense qu'il sera le meilleur pour aller chercher les informations. Dans notre contexte, la catégorisation proposée par Sallaberry nous a semblé revêtir les attributs susceptibles de nous aider à mieux comprendre ce que les élèves allaient nous donner à voir. Cette catégorisation jouant sur les deux tableaux, « ce que je décris » (la sphère des R1) et « ce que j'interprète » (la sphère des R2), elle devrait être en mesure de pouvoir révéler des indices de fonctionnements intéressants et ainsi nous donner des informations sur les processus empruntés par les élèves. Nous décrirons les indicateurs, en particulier pour les R2⁴² qui ont été ajoutés à ceux proposés par Sallaberry, dans un souci d'affiner notre regard sur les représentations.

À ce propos nous avons décidé de donner des codifications spécifiques pour toutes les représentations R1, indices R2 et coordinations R1-R2 qui « parlent » de l'invariant. Ainsi les codifications R1(a), R2(c) et R1-R2(e) sont celles où l'invariant est directement en jeu, R1(b), R2(d) et R1-R2(f) seront les codifications où il ne l'est pas. Ces distinctions se justifient dans la mesure où nous nous focalisons sur la construction de l'invariant.

II-1-4 Recherche d'indicateurs ; élaboration d'indices de construction pour l'invariant et pour le concept

II-1-4-1 Les premiers outils

Si les indicateurs pour les R2 peuvent pour certains être anticipés, nous partons de l'idée que la distribution nous réservera inévitablement des surprises et qu'il nous faudra peut-être nous adapter en prenant en considération les émergences successives⁴³.

Dans la mesure où nous recherchons des indices susceptibles de montrer qu'il existerait un lien, dont la force est à évaluer, entre *invariant(s)* et *concept scientifique*, il nous faut imaginer comment percevoir les niveaux de constructions des deux compères.

Pour y parvenir, il nous est apparu que partir des définitions des invariants et concepts étaient, si ce n'est le plus simple, pour le moins le plus légitime.

Ainsi, pour l'invariant, nous avons défini au départ des niveaux de construction (I_x)⁴⁴ où l'indice « x », définit le niveau atteint, et hiérarchise l'aptitude du sujet à donner les attributs de cet invariant *par conservation-transformation* (celui-ci portant l'idée de continuité de présence).

À titre d'exemples :

- le niveau I_0 (rebaptisé I_1 en seconde lecture)⁴⁵ est décelable dès que l'élève évoque l'idée de *disparition*, laquelle est incompatible avec la continuité de présence qui caractérise l'invariant.

- le niveau I_4 (le plus élevé) est atteint à partir du moment où la continuité de présence est explicitée.

Enfin, pour le concept, nous avons défini des niveaux de construction⁴⁶ (C_y) où l'indice « y » définit un niveau d'acquisition du concept allant de « non acquis » à « vraisemblablement acquis ».

À titre d'exemples :

- le niveau C_0 est donné si le concept est « non acquis ».

- le niveau C_2 sera proposé si le concept est « vraisemblablement acquis »

⁴² Cf. *infra* Chap VI (II-2) puis Chap VII (III-1)

⁴³ Nous n'imaginons pas que certains élèves puissent utiliser des figures de styles.

⁴⁴ Cf. *infra* Chap VI (II-2) puis Chap VII (III-1)

⁴⁵ Cf. *infra* Chap VI (II-2) puis Chap VII (III-1)

⁴⁶ Cf. *infra* Chap VII (III-1) pour l'évolution des symboliques utilisées pour le concept au gré des résultats obtenus

Ainsi, le croisement des deux constructions **s'avère être une obligation** qui peut nous donner des éléments de réponses quant au lien entre les deux protagonistes (l'invariant et son concept, ou réciproquement).

Nous reviendrons plus en détails sur ces deux constructions qui deviennent des outils d'analyses spécifiques, lesquels ont été élaborés pour notre situation.

II-1-4-2 Les adaptations nécessaires

Après avoir éprouvé tous ces outils sur notre premier corpus, nous sommes parvenus à des résultats *qui auraient pu nous satisfaire* s'agissant des éléments de réponses qu'ils nous offraient sur la force du lien entre invariant(s) et concept. À y observer à deux fois, les choix des différents niveaux de constructions (tant de l'invariant et plus particulièrement du concept) donnaient le sentiment qu'ils avaient pu être établis « pour montrer ce que l'on recherchait ».

Pour le concept, les liaisons revêtaient un parfum de tautologie irrespirable et prenaient en otage les sujets en ne laissant « aucune chance » à la distribution de s'exprimer pleinement.

« On a donné le ballon, défini les règles, laissé les acteurs s'exprimer, mais sifflé la fin quand le score était en notre faveur ; côté fairplay, on repassera !! »

Ainsi nous sommes allés chercher dans deux autres corpus, les attributs de cette liaison en revenant en profondeur sur nos outils pour qu'ils soient « irréprochables » (vœu pieux, mais cette fois-ci, les bases de leur construction sont à bords nets).

Pour le concept en particulier, nous avons défini des niveaux de construction⁴⁷ (C_y) où l'indice « y » définit la capacité du sujet à restituer ce qui se « cache » derrière le concept, à savoir l'idée de conservation - pendant une transformation, mettant l'élément en jeu sous différentes formes. Trois indices⁴⁸ essentiels ont été alors repérés.

À titre d'exemples :

- le niveau C_1 est donné si aucun des trois indices n'est repérable.
- le niveau C_3 sera proposé si deux des trois indices sont présents au sein des représentations du sujet.
- le niveau C_5^* (le plus élevé) est proposé si les trois indices sont présents et qu'ils sont utilisés dans une perspective de généralisation du concept.

Cette adaptation tient compte à la fois d'une autocritique générale à l'issue d'une première exploitation, et des résultats obtenus « trop favorables » au regard de notre hypothèse de départ selon laquelle invariant et concept auraient été, pour ainsi dire, indissociables.

Nous avons donné, succinctement pour l'instant, notre manière de travailler l'invariant et le concept, mais nous reviendrons en détails sur les différents aspects de la méthode dans les deux chapitres suivants (6 et 7).

II-1-5 Les filiations cognitives des sujets

Si nous sommes dans une logique de recherche, comment oublier le terrain, celui où l'avenir des sujets (et le nôtre) se joue ? Cette aventure a pour vocation de trouver des transferts possibles pour l'espace des quatre murs d'une classe. Aussi, il nous a semblé comme une évidence de devoir rapprocher *le réalisé*, ce que le sujet avait pu atteindre en fin de séance s'agissant de sa construction du concept, et *le produit* : ses représentations.

Nouvel espace de jeu, nouvelle manière d'utiliser l'outil représentation. C'est ainsi que naît l'idée de *filiation cognitive*. Ces filiations donnent la qualité (R1/R2/R3) et la quantité des

⁴⁷ Cf. *infra* Chap VII (III-1)

⁴⁸ Cf. *infra* Chap VII (III-1)

représentations produites par un sujet au cours du protocole en la mettant en regard de la liaison invariant-concept atteinte.

Filiation tout d'abord, car elle s'appuie sur le cheminement du sujet au cours du protocole.

Filiation aussi, car elle met en scène concrètement l'interdépendance entre les différentes représentations du sujet.

Filiation enfin, dans la mesure où elle est génétiquement liée au sujet, à sa propre « histoire ».

Cognitive s'impose comme une évidence car les représentations sont bel et bien des symptômes extérieurs d'une aventure intérieure, d'un processus.

« Dis-moi comment tu représentes et je pourrai tenter de m'aventurer à imaginer qui tu es⁴⁹, et comment t'aider ».

En conclusion, pouvoir mettre en parallèle les mécanismes cognitifs observables, via les *filiations cognitives*, avec les résultats obtenus du niveau de construction du concept, est un souci didactique qu'il aurait été regrettable (impardonnable) de négliger.

II-2 Réflexions sur la méthode

II-2-1 La représentation est un objet complexe

Il n'y a rien de *compliqué* dans une représentation car celle-ci est *complexe*. Ce qui est compliqué peut être décortiqué en éléments plus simples. Il est vain de croire qu'une représentation puisse être simplifiée. En revanche, comme tout système complexe, une représentation est modélisable⁵⁰. Attardons-nous ici sur les aspects épistémologiques du statut de la représentation dans la mesure où elle est notre support d'étude. S'intéresser à la représentation d'un sujet nous amène inévitablement vers des considérations constructivistes.

Si le terme « constructivisme » est souvent associé aux paradigmes de l'apprentissage, Le Moigne (1995), lui, le hisse au rang d'épistémologie.

Qu'y-a-t-il d'absolument certain dans une représentation si ce n'est ce que l'observateur pense y voir⁵¹ ? L'interaction sujet-objet n'est-elle pas ici à son apogée ?

L'hypothèse *phénoménologique* prend le pas sur l'hypothèse *ontologique*. L'histoire n'est pas écrite à l'avance car chacun est doué d'imagination par sa nature imprévisible. L'*hypothèse téléologique* s'impose d'elle-même. Dans le monde de l'abnégation c'est ce que l'on appelle : « la beauté du sport ». La représentation est indécomposable, seule une modélisation systémique est recevable. Un tel système est reconnaissable à partir des trois axiomes proposés par Le Moigne⁵² : opérationnalité (action intelligente) - irréversibilité (au fil du temps) - inséparabilité (liens entre, observé et observant, produit et opération).

La représentation est un symptôme de l'action intelligente qui mène chaque individu à construire son propre cheminement. Il n'y a rien de programmable dans une représentation.

Le temps est source d'inspiration, il participe activement à la transformation des représentations. Observer implique d'accepter de faire soi-même partie des interactions qui se jouent (de devenir paramètre et d'intégrer la cohorte des conditions initiales). Nous savons bien que le fait d'être physiquement présent dans une classe module le climat de celle-ci et affecte les comportements individuels. Toute mesure est une interaction. La mécanique quantique nous révèle que les aspects probabilistes ne sont pas dus à notre déficience de connaissance ou à l'imprécision de nos outils, mais bel et bien au fait même de devoir utiliser des outils, lesquels interagissent avec les phénomènes que nous voulons observer.

Peut-on avancer qu'il est possible de modéliser un système qui produit une représentation ?

⁴⁹ On touche ici au volet **Psychopédagogique** (« Que faut-il pour enseigner ? ») de Morandi (1997)

⁵⁰ Le Moigne (1995) p11

⁵¹ Cf l'exemple du dessin d'un martin pêcheur (extrait du magazine Punch) exploité par Varela (1996 p43). L'oiseau « pense » sa proie, afin de la « voir » sous une direction qui lui permette de la capturer.

⁵² Le Moigne (1999) p36

Le Moigne suggère neuf niveaux⁵³ de modélisation des systèmes complexes. Les trois derniers (septième, huitième et neuvième niveaux), se caractérisent par leurs aptitudes respectives à coordonner ses décisions d'action, imaginer et concevoir de nouvelles décisions possibles, se finaliser (de décider sur sa décision). Nous tenterons d'observer des indices de tels comportements au sein des représentations que nous analyserons.

Venons-en aux méthodes utilisées pour aborder la complexité des représentations que nous voulons analyser.

II-2-2 La prise en compte de la complexité

Comme nous avons dû patienter jusqu'à l'envoi de la sonde soviétique Luna3 en 1959 pour observer la face cachée de la lune, nous devons imaginer les moyens de pouvoir observer la complexité de ces objets que sont les concepts, leur face cachée.

II-2-2-1 La multiréférentialité

Afin d'aborder cette complexité dans les meilleures conditions, nous proposons comme le suggèrent Ardoino⁵⁴ et Sallaberry⁵⁵ de prendre en considération un contexte multi référencé. Il s'agit d'utiliser plusieurs outillages théoriques conçus comme complémentaires les uns des autres.

Nous présentons :

- les outillages théoriques (multi référentiels)

1/ La structure (**S, I, S**) proposée par Vergnaud

2/ La définition théorique du concept de l'élément chimique par Martinand

3/ La catégorisation de la représentation (R1/R2/R3) proposée par Sallaberry

- les nouveaux outillages adaptés à la situation :

A/ Les niveaux (I_x) de constructions de l'invariant *par conservation-transformation*

B/ Les niveaux (C_y) de constructions du concept de l'élément chimique

C/ La liaison invariant-concept ($I_x - C_y$) atteinte par un sujet

D/ La *filiation cognitive* d'un sujet

Le référentiel 1/ définit le contexte de travail.

Les outils A et B ont été élaborés à partir du référentiel 2/

À partir de ces outillages, nous allons croiser les résultats obtenus, en espérant que de nouvelles tendances émergent.

L'outil C est déduit des outils A et B ; il doit nous donner des indications sur le niveau d'intimité qui lie l'invariant *par conservation-transformation* et son concept.

L'outil D est élaboré à partir de l'outil C et du référentiel 3/ ; il doit nous donner des indications sur des éventuelles correspondances entre la manière dont un sujet s'exprime (construit ses représentations) et ses niveaux de constructions atteints de l'invariant et du concept.

Ainsi, nous nous donnons les moyens, par la diversité des référentiels sollicités, qui viennent des horizons des mathématiques et des sciences cognitives, de mettre en œuvre une dynamique de recherche dont la portée est ancrée dans des applications en sciences de l'éducation et de la formation.

Le changement de terrain disciplinaire de la structure (**S, I, S**) proposé par Vergnaud (qui se confronte aux domaines des sciences physiques), d'une part, et l'exploitation de la

⁵³ Le Moigne (1999) p58-64

⁵⁴ Ardoino (1990)

⁵⁵ Sallaberry (2004)

catégorisation des représentations de Sallaberry (qui devient « une liseuse » d'un cheminement interne (d'un processus) du sujet pour mieux adapter les scénarios pédagogiques), d'autre part, sont des témoignages de notre volonté de rechercher, dans ces outils, de la complémentarité et de la remise en question de leur efficacité prévue, qui pourrait les faire croire universels⁵⁶.

II-2-2-2 L'émergence d'une forme

La situation didactique proposée aux élèves met en scène un scénario basé implicitement sur l'émergence d'une forme. Cette situation est structurante et ouverte. L'augmentation importante des productions (des représentations) chez les élèves lors de la formation du métal cuivre⁵⁷ est vraisemblablement le témoignage d'une restructuration, d'une réorganisation des différents éléments de la situation didactique. On peut, ici, parler d'émergence d'une forme.

Dans le sport de haut niveau, les titulaires n'existent qu'au travers des remplaçants et réciproquement, l'ensemble des joueurs (les *éléments*) constituant l'équipe (la *forme*). Une équipe ne peut être composée sans titulaires et remplaçants lesquels sont définis dans et par l'équipe. Les statuts des joueurs dépendent de l'équipe et réciproquement.

Dans notre cas, la *forme* est celle de la conservation de l'élément chimique au cours des transformations. Les *éléments* sont représentés, parmi l'ensemble des espèces chimiques mises en jeu, par celles qui contiennent l'élément chimique. Chaque espèce chimique contenant l'élément chimique étudié est un état local du système, l'état global, lui, correspond ici au concept même de l'élément chimique. En définitive, le scénario soumis aux élèves consiste à s'appuyer sur les états locaux (les *éléments* que sont les espèces contenant l'élément chimique) pour faire émerger (la *forme*) le concept de l'élément chimique.

II-2-2-3 Le choix des supports

Nous cherchons à récupérer le maximum d'indicateurs externes du cheminement interne des élèves. Ainsi nous avons décidé de « jouer » sur la diversité des supports.

Une première expérimentation de recherche sur le concept de l'élément chimique en 2002⁵⁸, dans une classe de seconde générale, s'était révélée riche d'enseignements quant au choix des supports à proposer aux élèves. En effet, il en était ressorti quelques constats comme celui de devoir « laisser-faire » pour se donner les moyens d'observer ce que les élèves pensent.

Ainsi, nous avons donné la possibilité à chaque élève de pouvoir s'exprimer⁵⁹ « librement » pour chaque expérience. Nous avons pensé utile de donner à tous les élèves des espaces de liberté en fin de séance pour qu'ils « résument » leurs idées, puis qu'ils les synthétisent au maximum comme pour en récupérer l'absolue⁶⁰.

Cela engendre une certaine quantité de matière à traiter par la suite, mais ce n'est qu'à ce prix que l'on peut espérer lire au plus près « ce qui s'est probablement passé pour chacun d'entre eux ».

III- La position du chercheur

À l'issue des différentes comparaisons épistémologiques⁶¹, il semblerait qu'il n'existe pas de lien véritable entre épistémologies *positiviste* et *constructiviste*. Bien au contraire, et c'est ce qui confère au recadrage de Le Moigne tout son intérêt. En effet, si le patrimoine génétique des deux épistémologies diffère, il existe pour autant un gène « commun » les reliant

⁵⁶ Sallaberry (2004) p158

⁵⁷ Cf. *infra* Chap VI (I-2-2)

⁵⁸ À cette époque j'enseignais dans un des lycées où la recherche a été menée en 2010.

⁵⁹ Cf. *infra* Chap VI (I-3)

⁶⁰ Liquide très concentré obtenu après distillation à l'issue de l'enflourage pour réaliser des parfums

⁶¹ Cf. *supra* Chap V (I-2)

inexorablement : *l'interaction sujet-objet*. Pour l'épistémologie constructiviste, ce paramètre est une raison d'être, un fil conducteur dont l'intérêt et l'importance sont mis sur un piédestal. Pour la seconde, c'est un paramètre non influençant, un *epsilon* qui n'a que peu d'intérêt.

Quand l'interaction bat son plein, alors tout est possible ; dès qu'elle se dissipe, on rentre dans le tout prévisible. La vitesse est à la mécanique relativiste ce que l'interaction sujet-objet est au constructivisme : le paramètre qui explique son existence. L'épistémologie positiviste s'affiche alors comme le cas limite de l'épistémologie constructiviste quand l'interaction sujet-objet devient négligeable. Ce qui amène Sallaberry à cette formulation : « ...l'épistémologie constructiviste, en tant qu'interactionniste, est susceptible de généraliser l'épistémologie positiviste »⁶². On retrouve ici, dans une certaine mesure les caractéristiques de la proposition généralisante de Varela⁶³ entre énoncé et cognitivisme avec un paramètre qui serait *la co-émergence sujet-monde*.

Dans ce contexte de causalité certaine pour les uns, d'acceptation de la différence pour les autres, doit-on véritablement s'attarder sur les extrêmes, sur le début et la fin ?

Il paraît digne d'intérêt de porter son regard sur le cheminement de pensée, *le processus*, sur ce qui dérange voire divise. Si les « bords » sont tangibles voire identifiables, la manière dont l'individu construit son savoir l'est beaucoup moins. En effet, il faut saisir « au vol » une logique cognitive individuelle dont les signes extérieurs ne sont pas aisément décelables.

Si A donne B et que B donne A, n'y a-t-il qu'un « chemin » cognitif qui lie ces deux événements ? Pour pouvoir l'observer, il faudra créer les conditions qui permettent la révélation extérieure des cheminements intérieurs. Quand le *micro* ne nous est pas accessible alors à défaut, le *macro* prend le relais comme palliatif – mais ce serait une grave erreur de croire que ce que nous pouvons observer puisse point par point « remplacer » ce qui se joue dans la psyché des sujets. Évaluer le cognitif est une entreprise particulièrement délicate.

Peut-on encore croire que le seul sommatif peut rendre compte de la stabilité d'un savoir ?

Pendant des années, les évaluations étaient conçues avec l'ambition qu'elles pouvaient donner des informations « ultra-fiables »⁶⁴ sur les élèves. Rarement étaient pris en considération les processus ; les résultats, seuls, étaient vus comme les indicateurs essentiels d'une réussite.

Cela nous fait penser aux évaluations P.I.S.A.⁶⁵ qui rendent compte de la faiblesse de nos jeunes de 15 ans dans notre pays à engager des explications. Le critère « expliquer » est en berne dans l'hexagone. Quelle ne fût pas notre surprise de voir que les questions relevant de cet item étaient des Q.C.M.⁶⁶ ; peut-on imaginer évaluer une activité cognitive individuelle sans que ces individus ne produisent leurs propres représentations ?

Doit-on les évaluer à partir des représentations imposées par d'autres ? Peut-on véritablement « observer » un comportement cognitif par procuration ?

Nous avançons que laisser le sujet s'exprimer (ce qui nécessite d'interroger les conditions susceptibles d'être les plus favorables) est une base de travail frappée du bon sens.

Durant toute cette nouvelle expérience, il a fallu osciller entre différents statuts : être chercheur (ou en passe de le devenir), être enseignant (ou tenter de s'en approcher).

⁶² Sallaberry (2004) p157

⁶³ Cf. *supra*. Chap II (II) le paramètre est alors la co-émergence sujet-monde. J'advie au Monde (comme sujet) en construisant des représentations ; ce faisant, je fais émerger un Monde ; il y a bien co-émergence sujet-Monde et pour conséquence immédiate : je ne saurai jamais tout de ce Monde.

⁶⁴ Les moyennes des élèves sont parfois données au centième de point dans leurs bulletins.

⁶⁵ Programme for International Student Assessment / PISA est une enquête menée tous les trois ans auprès de jeunes de 15 ans dans les 34 pays membres de l'OCDE et dans de nombreux pays partenaires.

⁶⁶ Questions à choix multiples

Épilogue

Aujourd'hui, j'avoue humblement ne pas *tenir* véritablement mon statut. Est-ce le fait d'enseigner depuis si longtemps qui trouble le jeu ? Est-ce le fait d'avoir soumis le contexte de la situation didactique à *mes* collègues du second degré ? J'ai eu un peu de mal à *me* positionner entre ces divers attributs, ce qui aura pu altérer parfois *mon* appréciation. J'ai dû dompter le côté affectif et faire preuve de rigueur dans *mes* analyses, reprenant à plusieurs reprises les comptages fastidieux : *pour être sûr.....*

Petit à petit, la météo s'est faite plus clémente et j'ai commencé à mieux comprendre comment le caractère impersonnel des chiffres et des tableaux pouvait devenir lumière et perspectives enjouées.

Le premier bilan de ce début d'aventure a trait au statut des protagonistes. On ne s'improvise pas chercheur comme on ne s'improvise pas enseignant. Alors s'improviser enseignant-chercheur, vous imaginez !! Si chercher veut dire rechercher des réponses à des questions légitimes, alors il est tentant de le devenir. Si enseigner veut dire tenter de se faire comprendre, alors il est légitime de souhaiter le rester.

La question sous-jacente à cette discussion, qui peut sembler puérile, est l'avenir de la formation des enseignants. Peut-on chercher sans enseigner, peut-on enseigner sans chercher ? Peut-on hiérarchiser les statuts ? La réponse de l'université est dans son choix de la double dénomination. Cela paraît fort juste, en définitive, et frappé d'une grande sagesse. Opposer des mondes qui se nourrissent l'un l'autre fait-il sens ?

La formation vous enseigne « quoi transmettre », vous donne des clefs pour comprendre « comment transmettre », mais elle ne peut pas grand-chose pour vous aider à cerner qui est celui ou celle qui « s'apprête à transmettre ». Vous êtes seul(e) face à vous-même, à votre histoire, laquelle peut vous revenir comme un boomerang.

Enseigner c'est aussi prendre conscience de qui vous êtes, et cela peut être particulièrement « violent »⁶⁷.

Dans un tel environnement, ne faut-il pas laisser l'enseignant enseigner ? lui laisser sentir le scénario, lui laisser les clefs pour « jouer » avec son groupe ? le laisser tout à sa joie de vivre son métier, de faire sourire, rire son auditoire pour mieux le porter vers ce désir de l'effort. Ne plus enseigner est-il envisageable ? Et le chercheur dans tout cela ? Faut-il qu'il soit relayé au premier, au second plan ?

Il semble que la question de la hiérarchie soit très mal venue. Il n'y a pas, d'un côté, celui qui impose et, de l'autre, celui qui obéit, tout d'abord parce que la relation qui les lie est symbiotique et enfin parce que le respect mutuel devrait aller de soi. De plus, la recherche en sciences de l'éducation s'appuie sur l'enseignement comme un laboratoire auto-évaluatif et l'enseignement s'appuie sur la recherche pour y trouver des réponses à son quotidien.

Ne peut-on pas avancer qu'enseigner, tout comme chercher, revient avant tout à rester « vivant » et donc : *à se poser des questions et à tenter d'y répondre ?*

⁶⁷ Je me souviens de cette réflexion que m'avait faite une jeune collègue stagiaire agrégée (au parcours (trop) brillant) lors d'une « visite » à l'I.U.F.M : « *Je ne comprends pas, ils (les élèves) travaillent mais ils ne réussissent pas, ce n'est pas normal...* ». On voit ici comment le lien causal qui a vraisemblablement été le sien « doit », selon elle, s'appliquer à tout le monde – on touche du doigt la valeur de l'échec, toute proportion gardée bien entendu. J'ai tenté de lui faire comprendre que chacun d'entre nous est un jour confronté à ses *limites* (terme qu'elle ne semblait pas avoir jusqu'ici rencontré au cours de son propre parcours) [Merci aux défaites cuisantes et aux désillusions vécues sur les terrains en terre battue.....].

Nul doute qu'à la fin de cette histoire, nous aurons réussi à écrire des bribes de réponses à une problématique qui nous est chère. Pour autant, ce que nous aurons observé à Ribérac, à Périgueux, à Fort de France ne saurait être tenu comme vérité établie, tant les représentations sont des objets incertains, complexes et de plus perturbés par les acteurs que nous sommes, dès qu'il s'agit d'engager leur lecture. Et si l'intérêt de cette recherche n'était pas de tenter de les rendre plus accessibles ?? A défaut de naviguer à vue, les sciences cognitives ne sont-elles pas un outil utile pour lire les informations difficiles d'accès ?

Nous venons de débattre dans cette première partie des outils nécessaires à notre recherche. Nous allons désormais, dans cette seconde partie, rendre compte en détails de la méthode utilisée et des stratégies mises en place pour se donner les moyens de pouvoir approcher au plus près du cognitif des sujets.

Nous expliquerons comment il nous aura fallu inventer et adapter nos outils pour parvenir à récupérer le maximum d'informations et pour les traiter avec le plus d'objectivité possible. Nous aborderons ce qui nous semble envisageable, non pas d'avancer, mais pour le moins, de tenir comme une base informationnelle qui pourrait devenir digne d'intérêt.

Ainsi, les deux prochains chapitres de la seconde partie décrivent nos contextes de recherche, nos outils, et proposent, à la lumière des résultats obtenus, quelques hypothèses qui pourraient être lues avec l'idée de les faire vivre pour et par la formation.

SECONDE PARTIE : Le concept de l'élément chimique, invariant(s) et didactique, autres concepts et perspectives.

Chapitre VI L'élément chimique : première lecture

Chapitre VII L'élément chimique : seconde lecture

Chapitre VIII Premier bilan

Chapitre IX Ébauches exploratoires sur d'autres concepts

Synthèse de ce chapitre

À ce stade de notre recherche deux grandes tendances se dégagent.

-La première est que nous sommes en mesure de porter l'idée selon laquelle il existerait un lien entre la construction de l'invariant et celle du concept (sur notre exemple). La structure (S,I,S) proposée par Vergnaud nous apparaît en première lecture « opérationnelle » pour le concept d'élément chimique.

-La seconde étant qu'il n'est pas exclu que, parmi les différents éléments des filiations cognitives des sujets ($[I_x - C_y]$ / R1[a/b] / R2[c/d] / R1-R2[e/f]), les représentations construites en cours d'apprentissage par ceux-ci, aient « leur mot à dire » dans la stratégie de conquête de l'invariant et donc du concept.

Depuis qu'il m'a été donné¹ d'enseigner le concept de l'élément chimique, cette partie du programme m'est apparue plutôt simple tant son caractère prédictible semblait être de nature à rassurer les élèves. Il y a ce tableau, celui de Mendeleïev, qui se lit comme un livre ouvert et qui nous raconte des histoires simples sur les particules élémentaires². Il y a cette facilité à compter case après case les électrons, ces structures électroniques à attributs communs pour les colonnes et bien d'autres repères susceptibles de faciliter la compréhension générale, sans oublier les moyens mnémotechniques³ qui permettent de retenir les noms des différents éléments.

Bref, tout semble être réuni pour un enseignement paisible et sans encombre. Cela peut expliquer pourquoi cette partie du programme n'a jamais vraiment fait l'objet de réel débat en formation continue ou au sein des laboratoires de sciences physiques dans lesquels j'ai pu exercer. Chacun faisait ce travail sans véritable concertation tant il nous apparaissait « acquis », pour ne pas dire « évident ». C'est dans ce climat que J-C Sallaberry m'a demandé en 2002⁴ de tenter de récupérer ce que les élèves pouvaient spontanément comprendre de ce concept dans les deux classes de seconde générale dont j'avais alors la charge. Les supports que j'avais imaginés étaient trop directifs et ne laissaient pas suffisamment de place aux élèves. Il était difficile de dire ce qui relevait de l'intention de l'élève et ce qui relevait de l'intention de l'enseignant tant les supports étaient trop inductifs. Grâce à cette expérience lointaine, qui me permit d'aborder le concept à l'endroit et qui remit ses fondamentaux au centre de mes préoccupations, il nous a été plus aisé de concevoir des outils plus en accord avec les attendus de cette nouvelle recherche.

I- Éléments de contexte et outils de récupération des données

I-1 Descriptif environnemental

Le choix du contexte, dans un premier temps s'est focalisé sur le lycée le plus proche de mon domicile, le lycée A. Daniel⁵ de Ribérac en Dordogne. Il s'agit du lycée où j'avais mené cette première expérience dix ans plus tôt et où il m'était possible d'être accueilli dans de bonnes conditions et par l'administration et par les anciens collègues.

Le lycée de Ribérac est un établissement qui appartient à une cité scolaire, avec un collège et un lycée professionnel, situé au centre ouest du département en Périgord vert⁶.

Année	Taux de réussite	Rang départemental	Rang national	Variation
2011	90%	12/31	1671/5627	+2.39%
2010	88%	14/31	2274/5627	+0.61%
2009	87%	18/31	2466/5627	-3%
2008	90%	8/31	1356/5627	-3%
2007	93%	8/31	888/5627	+14%
2006	79%	22/31	2747/5627	-10%
2005	89%	3/31	700/5627	+5%
2004	84%	6/31	1136/5627	+1%
2003	83%	7/31	1267/5627	-

Ci-dessus les résultats⁷ au baccalauréat du lycée A. Daniel toutes sections confondues pour les neuf dernières années.

¹ J'ai enseigné ce concept pour la première fois en tant que fonctionnaire stagiaire (CPR Bordeaux)

² Les particules élémentaires sont les neutrons, les protons et les électrons.

³ Pour la seconde période : Li/Be/B/C/O/F/Ne : « Lire Beaucoup Balzac Car Notre Orthographe Fait Négligée ».

⁴ Il y fait référence dans son ouvrage de 2004 p126

⁵ Troubadour célèbre qui inventa la « sextine ».

⁶ Le département est découpé en quatre zones géographiques pour des raisons de lisibilité touristique (noir, blanc, vert et pourpre).

⁷ D'après le site http://www.linternaute.com/ville/ville/lycee/23418/detail/lycee_arnaud_daniel.shtml (consulté le 10/04/2012)

Ribérac est une petite ville rurale, autrefois sous-préfecture, de quelques milliers d'habitants. Les élèves venant au lycée sont issus de nombreux collèges⁸ assez éloignés ce qui explique que l'écrasante majorité des lycéens se rendent dans cet établissement en autocar.

Le lycée a fait l'objet d'une restructuration financée par le conseil régional ces dernières années, dont la tranche « sciences » s'est achevée en 2010, juste avant la tenue de cette recherche. Les élèves ont expérimenté dans des locaux récemment réhabilités, et aux normes de sécurité en vigueur.

Le travail a été effectué pendant une séance de travaux pratiques qui dure une heure trente. Les élèves étaient répartis en binômes comme ils le sont d'habitude dans de telles circonstances.

Le collègue⁹ qui a joué le jeu avec enthousiasme est très investi dans la vie de l'établissement. Il a travaillé avec l'inspection régionale pour l'élaboration de scénarios pédagogiques qui mettent en scène la démarche par investigation au sein d'un groupe spécifique-lycée et a, par ailleurs co-animé des sessions de formations continues dans l'académie de Bordeaux pour les futurs programmes de terminale « S » (scientifique).

Nous avons eu plusieurs échanges pour construire la séance tant sur le fond que sur la forme avant d'en arrêter la structure finale. Nous nous sommes mis d'accord sur le formalisme des outils à distribuer aux élèves, sur le scénario pédagogique qui serait utilisé et sur le positionnement de l'enseignant durant la séance. Nous reviendrons sur les outils distribués et sur le protocole un peu plus tard.

S'agissant de l'attitude du professeur, j'ai souhaité que l'enseignant sorte de sa posture d'accompagnateur implicite. Celui-ci s'est contenté de décrire rapidement les enjeux de la séance et du protocole, les outils à remplir, la manière de les remplir (« Ce n'est pas noté » - « Exprimez-vous librement, sans retenue »..), le pourquoi de la présence d'une tierce personne dans la classe. Puis son rôle s'est tenu à garantir la sécurité des élèves, à maîtriser la *chronogénèse* afin que les élèves aient le temps d'expérimenter et d'élaborer leurs représentations. Le professeur n'a pas interagi plus avant sur le plan didactique, laissant les élèves mener leur barque au fil des expériences proposées. Cette position assez inhabituelle, et sans doute à contre-courant, a permis de limiter les ingérences et de favoriser le recueil spontané des représentations individuelles. Si l'expérience était menée à deux (en binômes), les élèves étaient seuls à remplir leurs différents documents. La mise en commun et l'institutionnalisation des savoirs a eu lieu en classe entière à la séance suivante en utilisant comme réactivation les divergences de points de vue des élèves s'agissant de la présence « du cuivre »¹⁰ durant le protocole.

Nous allons décrire en détail le déroulement du protocole expérimental retenu.

I-2 Descriptif du protocole retenu

I-2-1 Les protocoles proposés par Viovy

Ce protocole est pressenti par Martinand et Viovy (1979)¹¹ qui, discutant des moyens d'introduire alors le concept de l'élément chimique en classe de cinquième au collège, avançaient qu'il était opportun de proposer pour interpréter les réactions chimiques :

« - la possibilité de *cycles* de réactions permettant de retrouver un même corps après l'avoir « perdu » ».

Puis Viovy (1984)¹² reprit à son compte l'idée et la formalisa dans plusieurs cycles possibles (Carbone-Soufre-Fer et Cuivre). S'agissant du « cuivre », les deux cycles proposés portaient du métal cuivre. Ci-dessous nous présentons les deux chaînes (1) et (2) expérimentales à caractère cyclique imaginées par Viovy.

⁸ Six collèges sont dans la carte scolaire, distants du lycée de zéro à trente-cinq kilomètres.

⁹ M. Carbonel Cyril est certifié en sciences physiques

¹⁰ Ce nom est utilisé dans la vie courante pour caractériser la forme métallique

¹¹ Martinand J-L. & Viovy R. (1979) pp.878-884.

¹² Viovy R. (1984) pp.901-910

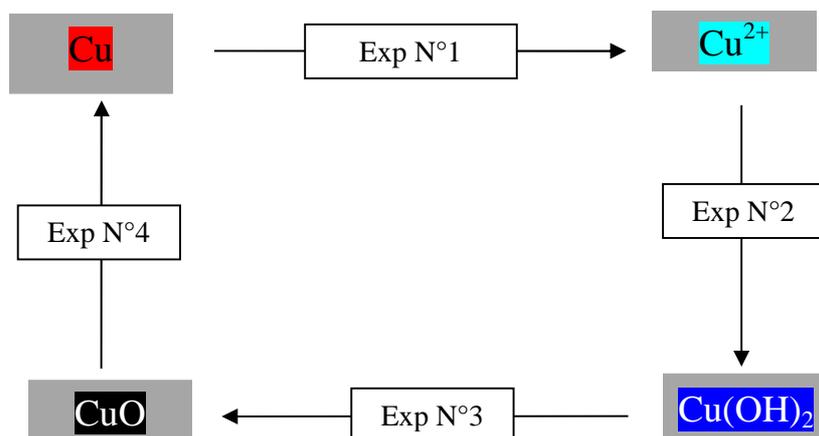


Après oxydation du métal par le dioxygène de l'air, l'oxyde de cuivre (II) produit peut réagir avec du carbone (1) pour reformer le métal cuivre ou peut, en réagissant en milieu acide (2), former des ions cuivres (II) qui en réagissant à leur tour avec le métal fer, formeront entre autres le métal cuivre de départ. Nous avons là deux exemples possibles qui illustrent l'idée des deux chimistes avec une chaîne à deux transformations et une chaîne à trois transformations.

I-2-2 Le déroulement du protocole retenu

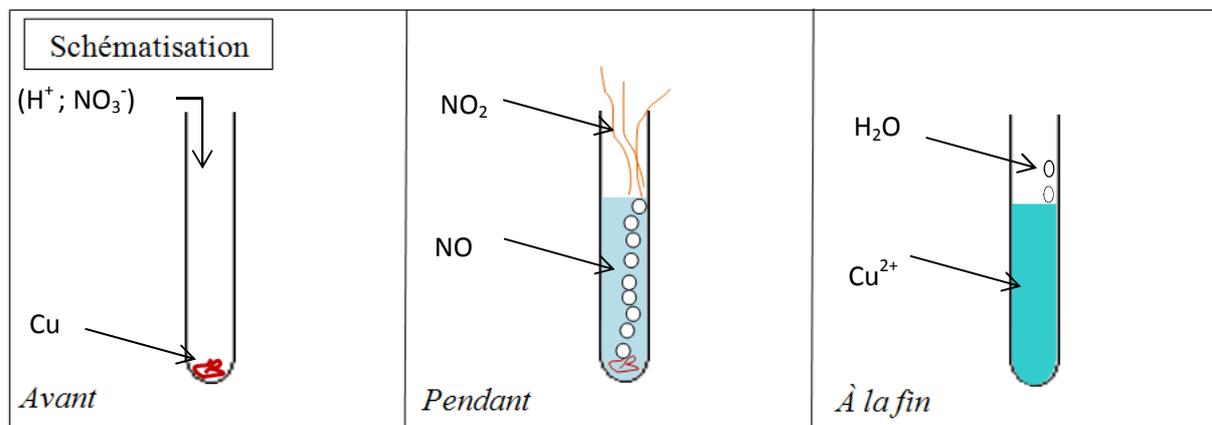
Nous avons décidé de proposer un cycle constitué de quatre transformations chimiques. Pourquoi quatre transformations ? Tout d'abord car le travail se situe en seconde générale et il nous a semblé légitime de proposer une expérimentation plus « dense » que celle imaginée pour le collège. Ensuite, nous espérons que les élèves « oublient » le métal cuivre au cours du protocole pour mieux le « retrouver » en fin de séance et ainsi que cet *effet de surprise* saura participer à une saine émulation cognitive qui pourrait être source, pour certains, d'une émergence de forme¹³.

Ci-dessous est résumé le principe général de la « boucle réactionnelle » faisant apparaître la succession des quatre expérimentations qui, partant du métal cuivre, se termine comme elle a débuté, avec le métal cuivre.



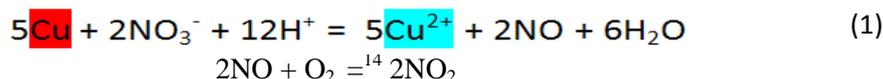
Nous allons maintenant détailler chaque transformation mise en jeu.

Expérience N°1



¹³Cf. *supra*. Chap V (II-2-2-2)

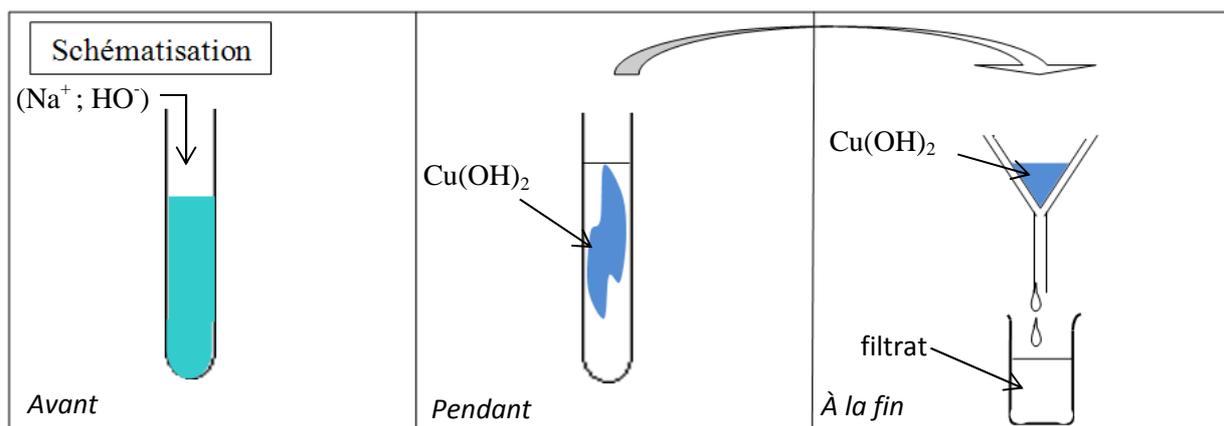
Sous la hotte, les élèves placent un petit morceau (environ 1 cm) de tournure de cuivre (Cu) dans un tube à essais. Puis ils y versent avec précaution environ 2 mL d'une solution d'acide nitrique concentré incolore (H^+ ; NO_3^-). Ils observent une effervescence (le monoxyde d'azote NO) dans la phase liquide ; le gaz formé réagissant avec le dioxygène de l'air forme au-dessus du liquide des vapeurs rousses (dioxyde d'azote NO_2). Dans le même temps, la phase liquide incolore au départ se teinte d'une couleur bleu (Cu^{2+}). En fin d'expérience, le métal est totalement consommé, l'effervescence s'est arrêtée, il n'y a plus de vapeurs rousses et il reste une phase liquide homogène bleue cyan. De fines gouttelettes incolores sont visibles sur les parois du tube à essai (H_2O). Le bilan des transformations mises en jeu est le suivant (il s'agit d'une réaction d'oxydoréduction pour (1)) :



Remarques :

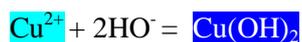
Cette première expérience est très riche (peut-être trop..) ; elle met en jeu, les trois états de la matière, des changements de teinte et constitue, à elle seule, de nombreux obstacles qui peuvent déboucher sur des interprétations erronées. La plus fréquente étant celle qui consisterait à dire que le métal a changé d'état, passant de l'état solide à l'état gazeux, eu égard à la continuité de la couleur « rouge » entre le métal et le gaz formé.. « Le métal s'est sublimé » !! Mais du même coup il n'est plus dans le milieu réactionnel, ce qui sera incompatible avec l'observation de la dernière expérience. Dans tous les cas, on peut espérer que cette contradiction *a minima* interrogera les élèves.

Expérience N°2



Dans un tube à essais, les élèves versent environ 1 mL de la solution obtenue dans l'expérience 1 contenant les ions cuivre (Cu^{2+}). À ce prélèvement, ils ajoutent goutte à goutte une solution concentrée de soude (hydroxyde de sodium : (Na^+ ; HO^-)). Ils observent la formation d'un précipité bleu clair (un solide dans une phase liquide) d'hydroxyde de cuivre II, ($Cu(OH)_2$).

À l'aide d'un filtre, ils séparent les composants du mélange précédent et les récupèrent séparément, le solide est alors piégé dans le filtre, le filtrat obtenu est incolore.



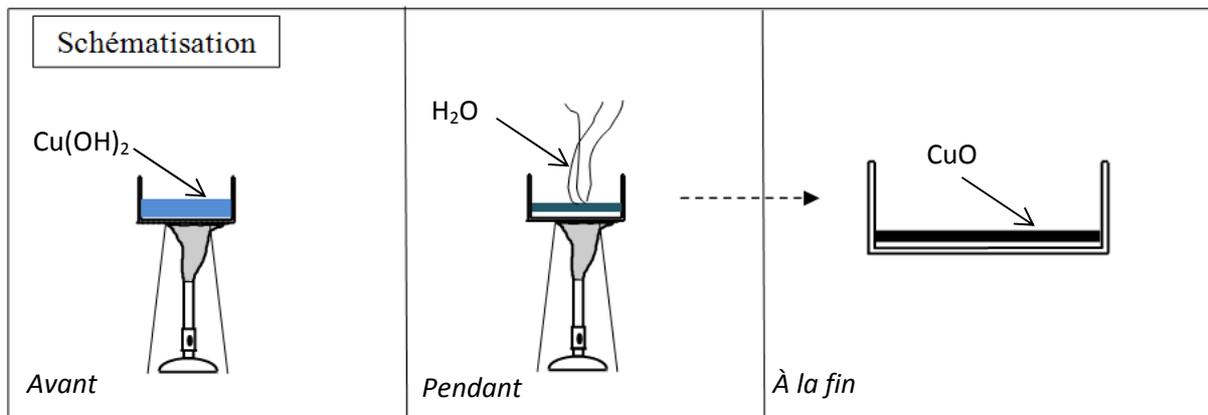
Remarques:

Ici l'obstacle rencontré majoritairement est le statut de l'état du composé chimique observé après l'ajout de l'hydroxyde de sodium. « Cette méduse », comme certains la nomment, est difficilement associée à un solide. Si la technique de filtration est bien maîtrisée en général, certains filtrats obtenus ne sont pas incolores mais très légèrement bleutés. Ceci vient très souvent de la quantité d'hydroxyde de sodium introduite dans le milieu qui n'est pas toujours en excès. Malgré les précautions, il faudrait

¹⁴ Nous notons que cette symbolisation du signe égal, si elle permet de mieux comprendre la conservation de la masse, ne définit pas que la transformation soit réversible.

sûrement au préalable peser le morceau de cuivre de l'expérience 1 pour s'assurer du volume minimum de soude juste suffisant pour précipiter tous les ions cuivre qui ont été formés. Une autre difficulté est ici inhérente au filtrat, car les élèves ont beaucoup de mal à identifier sa composition, ce qui n'est pas un problème pour l'objectif principal mais qui peut en déstabiliser certains.

Expérience N°3



Les élèves récupèrent un peu d'hydroxyde de cuivre II (Cu(OH)_2) présent dans le filtre de l'expérience précédente à l'aide d'une spatule et le disposent dans une coupelle en porcelaine. Puis, ils chauffent au réchaud électrique le solide récupéré. Au fur et à mesure, ils observent un changement de teinte du solide qui passe du bleu au bleu-vert, puis gris et enfin noir.

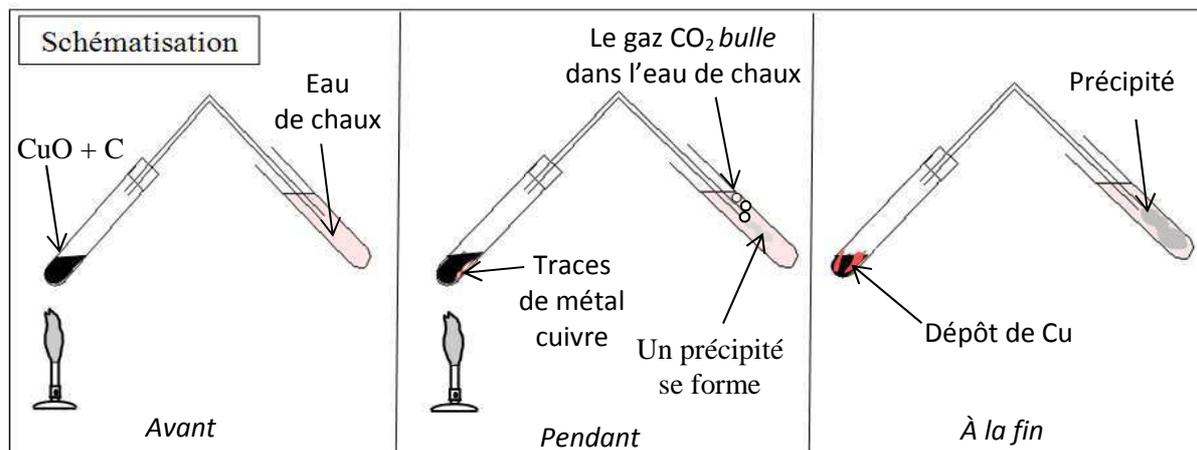
En parallèle, de la vapeur d'eau (H_2O) est formée qui est observable car de grosses bulles de vapeur viennent crever la surface du solide ; cette vapeur se condense immédiatement pour former un panache blanc constitué de fines gouttelettes d'eau liquide qui s'observe au-dessus de la coupelle en porcelaine. Puis, en fin de réaction, le panache devient invisible, signe que la réaction de déshydratation est terminée : l'hydroxyde de cuivre II s'est transformé en oxyde de cuivre II (CuO) qui est un solide noir.



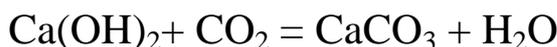
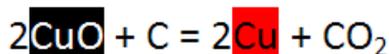
Remarques :

Outre la difficulté de faire réaliser cette expérience aux élèves (l'utilisation du gaz est désormais proscrite), le phénomène de déshydratation est rarement évoqué. En effet ce « petit nuage blanc » n'est pas toujours perçu comme étant de l'eau liquide. Par ailleurs, nombreux sont les élèves pour lesquels le résidu « noir » s'apparente à du charbon. La couleur de ce composé mais aussi son aspect les font tendre vers cette appréciation. De plus, le tableau des différentes espèces fait apparaître qu'il y a dans ce protocole deux solides de couleur noire, ce qui ne favorise pas l'identification. Enfin, il existe un doute chez les élèves sur le fait que l'expérience soit terminée ou en passe de l'être.

Expérience N°4



Les élèves chauffent fortement (pendant environ 5 minutes) un mélange de poudre de carbone (C) et d'oxyde de cuivre II (CuO) dans un tube (celui de gauche sur la schématisation), lequel est muni d'un tube coudé, dit « à dégagement », qui trempe dans de l'eau de chaux (solution saturée en hydroxyde de calcium Ca(OH)₂) contenue dans un second tube (celui de droite sur la schématisation). Au cours de l'expérience, il se forme un dépôt rougeâtre de métal cuivre (Cu) sur les parois du premier tube à essais ; par ailleurs un gaz se forme, le dioxyde de carbone (CO₂). Il est canalisé par le tube à dégagement et vient « buler » dans l'eau de chaux. Une réaction de précipitation caractéristique (laquelle aboutit à la formation de carbonate de calcium : CaCO₃) met en évidence la formation du gaz produit.

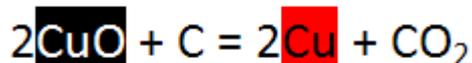
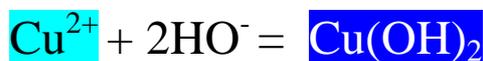
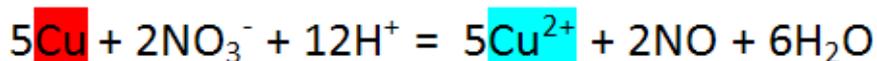


Remarques:

Le fait que les deux réactifs soient des solides de couleur similaire (noir) est une difficulté pour l'interprétation finale dans la mesure où les élèves ne peuvent pas utiliser des observables macroscopiques pour avancer des hypothèses sur la nature de la partie solide noire restante dans le premier tube. Par ailleurs, si la formation de dioxyde de carbone est trop importante, alors le précipité formé peut se transformer en solution ionique « ce qui vient troubler le jeu ».

Enfin la quantité de dépôt dépend beaucoup de la qualité du chauffage.

Le bilan des transformations chimiques mettant en jeu l'élément chimique cuivre est donc celui qui peut être résumé à partir des quatre écritures scientifiques suivantes :



Nous observons clairement que la *boucle réactionnelle* prend tout son sens dans la mesure où le produit ou l'un des produits de la transformation précédente, devient le ou l'un des réactifs de la transformation suivante. Nous comprenons que cette expérience puisse porter le nom usuel de « cycle du cuivre ». Nous voulons ainsi faire remarquer que rien *a priori* ne nécessite de commencer par la transformation mettant l'élément cuivre sous forme métallique ; nous aurions pu choisir¹⁵ de débiter « le cycle » par l'une des trois autres transformations.

I-3 Descriptif des supports

Nous distinguerons deux catégories de supports qui auront participé à cette expérimentation ; il s'agit d'une part, de celle qui apporte des éléments informationnels utiles aux élèves dans leur démarche, et d'autre part, de celle qui permet de collationner l'ensemble de leurs représentations construites au cours du protocole.

¹⁵ Ce choix sera débattu par la suite dans le chapitre VII (I)

I-3-1 Les éléments informationnels utiles aux élèves

Il y a deux supports distincts qui sont regroupés sur une même feuille de format A4.

- Le premier est présenté sous la forme d'un tableau¹⁶. Ce dernier a été conçu afin que les élèves puissent réaliser des liens entre leurs observations et l'identification des espèces mises en jeu au cours du protocole sans que l'enseignant ait à leur donner des indications directes sur « ce qui a bien pu se passer ». Le tableau est organisé en cinq colonnes.

ESPECES CHIMIQUES		CARACTERISTIQUES		SECURITE
Nom	Symbole	État	Couleur	
Métal Cuivre	Cu	Solide (métal)	orangé	
L'oxyde de cuivre	CuO	Solide	noir	
Carbone végétal	C	Solide	noir	
L'hydroxyde de cuivre	Cu(OH) ₂	Solide	bleu clair	
L'ion cuivre II	Cu ²⁺	En solution	bleu cyan	
Dioxyde de carbone	CO ₂	Gaz	incolore	
Monoxyde d'azote	NO	Gaz	incolore	
Dioxyde d'azote	NO ₂	Gaz	roux	
Eau	H ₂ O	Gaz ou Liquide	incolore	
Solution d'acide nitrique	(H ⁺ ; NO ₃ ⁻)	Liquide	incolore	
Solution de soude	(Na ⁺ ; HO ⁻)	Liquide	incolore	

Tableau susceptible d'apporter entre autres une aide à la reconnaissance des différentes espèces chimiques mises en jeu

La dernière a trait à des informations relatives à la sécurité qui informe des précautions à prendre (gants, lunettes, traitement des déchets...). Les troisième et quatrième colonnes vont de pair ; elles associent sur une même ligne une couleur à un état de la matière.

Les première et seconde, quant à elles, associent sur une même ligne le nom des composés chimiques rencontrés à leurs symboles respectifs. Ainsi, sur une ligne donnée de ce tableau, ce sont quatre informations complémentaires qui sont livrées (sans compter les données éventuelles relatives à la sécurité).

Par exemple, l'ion cuivre II qui possède la symbolisation Cu²⁺ est un ion dont la solution est de couleur bleu cyan ; il doit faire l'objet d'un traitement particulier car il est dangereux pour l'environnement.

Si la lecture d'un tableau s'effectue *a priori* de gauche à droite, ici l'élève devrait partir des colonnes 3 et 4 pour remonter aux informations contenues dans les colonnes 1 et 2.

- La seconde (ci-dessous) décrit la manière de réaliser chaque expérience en donnant des directives strictes de différentes natures. Elles vont du matériel spécifique à utiliser (tube à essais, filtre, spatule, coupelle), aux précautions à respecter pour manipuler dans les conditions de sécurité (« Sous la

¹⁶Cf. page suivante

hotte », « ..goutte à goutte.. »), à des indications comportementales (« verser avec précaution »). À chaque expérience est rappelé qu'il faut « compléter le document fourni », c'est-à-dire une feuille A4 spécifique pour chaque expérience.

Les verbes d'action sont notés à l'infinitif (verser, ajouter, séparer..) ce qui témoigne d'une mise en œuvre type « recette de cuisine » d'apparence éloignée des pédagogies « nouvelles ».

Il n'y a pas de place pour l'improvisation, les binômes effectuent des tâches successives. L'intérêt est donc ailleurs. Il réside dans la capacité individuelle à retranscrire fidèlement les observations et à être mis en état de *réfléchissement* en faisant état de ses interprétations.

Dans le cadre de la démarche par investigation, nous pourrions dire que nous avons créé les conditions favorables pour que les élèves produisent des questions productives ou émettent des hypothèses intermédiaires afin qu'une problématique puisse émerger.

EXPERIENCE 1 :

- Sous la hotte, placer un petit morceau (environ 1 cm) de tournure de cuivre dans un tube à essais.
- Verser avec précaution environ 2 mL d'une solution d'acide nitrique concentré.
- Observer et compléter le document fourni.

EXPERIENCE 2 :

- Dans un tube à essais, verser environ 1 mL de la solution obtenue dans l'expérience 1.
- A ce prélèvement, ajouter goutte à goutte une solution concentrée de soude (hydroxyde de sodium).
- A l'aide d'un filtre, séparer les composants du mélange précédent et les récupérer séparément.
- Observer et compléter le document fourni.

EXPERIENCE 3 :

- Récupérer un peu de solide présent dans le filtre à l'aide d'une spatule et le disposer dans une coupelle en porcelaine. Chauffer au bec bunsen.
- Observer et compléter le document fourni.

EXPERIENCE 4 :

- Chauffer fortement (5 minutes environ) dans un tube, muni d'un tube à dégagement trempant dans de l'eau de chaux, un mélange de poudre de carbone et du solide noir obtenu précédemment.
- Observer et compléter le document fourni.

Cette manière de procéder peut surprendre dans la mesure où, en général, on construit la problématique pour tenter d'y répondre. Toutefois, partir d'une problématique partagée comme : « Est-ce que le cuivre se conserve pendant le protocole ? » aurait été trop inducteur et nous aurions pris le risque de ne pas pouvoir distinguer les attributs de ce qui relève d'une dynamique cognitive individuelle

En définitive, nous pouvons considérer que cette séance a pour objet d'installer les conditions d'une controverse s'agissant de la conservation du « cuivre » pendant l'expérience. La formation (en fin de protocole) du métal cuivre est de nature à interroger les élèves sur sa présence tout au long du protocole, une réponse négative les amenant alors à réfléchir au « comment cela est-il possible ? ». Comment peut-on « former » le métal cuivre alors qu'il n'était pas présent de manière permanente tout au long du protocole ? Un guidage implicite vers l'émergence de la continuité de sa (l'élément chimique « cuivre ») présence peut naître chez les élèves. On touche ici à la différenciation entre « cuivre », utilisé dans le langage social pour identifier la forme métallique, et « cuivre », qui est utilisé à tort, pour identifier « l'élément chimique cuivre ».

Nous donnons ici quelques éléments d'appréciation qui permettent de comprendre comment « le piège » tendu aux élèves se referme sur eux, les amenant inexorablement vers le concept de l'élément chimique et vers le débat sur la polysémie du mot « cuivre ».

I-3-2 Les supports pour recueillir les représentations des élèves

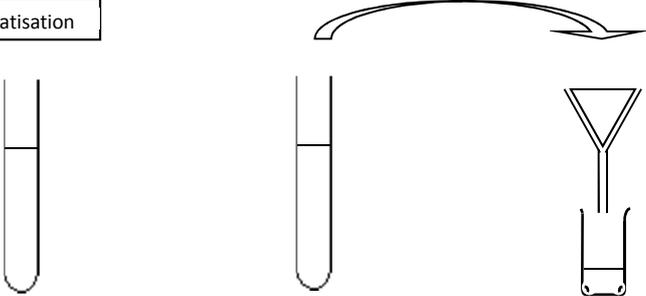
Chaque élève a pu remplir un support par expérience (une feuille de format A4) ainsi qu'un support de synthèse-bilan (autre feuille de format A4) et proposer un titre à la séance expérimentale (une petite bande de papier intitulée « Titre »).

Ainsi, chaque élève aura, à l'issue du protocole, rempli quatre documents de type A4 au plus près des expérimentations, un document l'ayant invité à réfléchir en prenant un peu de distance et en l'amenant à synthétiser ses diverses réflexions, et enfin un dernier document sous la forme d'un titre qu'il pourrait donner au TP proposé.

Cette diversité des supports doit faciliter les émergences que nous souhaitons observer en jouant sur la diversité des tâches attendues. Il y a, par ailleurs, une volonté de resserrement de l'émulation cognitive qui se finalise par une phrase (le titre).

-Les supports par expérience ont été conçus afin qu'un temps soit consacré à une « Schématisation »; la partie centrale invitait les élèves à décrire ce qu'ils avaient vu « *Mes observations : décrivez tout ce que vous pouvez observer* » et enfin la troisième partie était consacrée à leur interprétation des phénomènes observés « *Mon point de vue : Donnez votre (vos) interprétation(s) de ce qui a pu se passer* ». Ci-dessous est présenté le support pour la première expérience, les autres¹⁷ étant bâtis sur le même modèle (la schématisation varie car elle est adaptée au contexte de l'expérience).

Expérience N°2

Description du document de l'expérience N°2	Commentaires
<p data-bbox="196 909 384 947">Schématisation</p> 	<p data-bbox="1046 909 1380 1178">Cette partie est censée permettre de décrire les observables successifs de l'expérience par des R1 sous forme de codages spécifiques (couleurs-légendes).</p>
<p data-bbox="196 1249 767 1283">Mes observations Décrivez tout ce que vous avez pu observer.</p>	<p data-bbox="1046 1249 1380 1440">Cette partie est censée permettre de décrire par des représentations R1 les observables successifs de l'expérience.</p>
<p data-bbox="196 1619 938 1653">Mon point de vue Donnez votre (vos) interprétation(s) de ce qui a pu se passer</p>	<p data-bbox="1046 1619 1380 1888">Cette partie est censée permettre de décrire par des représentations R2 et coordinations R1-R2 les premiers indices favorables à l'émergence de l'invariant.</p>

¹⁷Cf. supra Chap VI (I-2-2)

-Le support de synthèse-bilan¹⁸, lui, devait permettre aux élèves de prendre du recul par rapport à l'ensemble des observations-interprétations et ainsi de favoriser l'émergence d'un lien entre les différentes expériences. Le choix de la consigne se voulait légèrement inducteur : « *Mon bilan : Que pensez-vous de cette série d'expériences* » sans pour autant aborder les attendus. Le terme *série* pouvait éventuellement laisser entendre que les expériences n'étaient peut-être pas indépendantes. Ce document était sous format A4.

Mon bilan	Que pensez-vous de cette série d'expériences ?
-----------	--

-Le support « titre »

Enfin, les élèves, par l'écriture d'un titre, étaient incités à resserrer plus encore leurs idées par un choix de lexique censé faire apparaître l'essentiel.

Cet effet d'entonnoir aurait pu se terminer par un choix de quelques mots-clés, mais nous avons pensé que la formulation d'un titre permettait d'observer les liens sémantiques implicitement choisis par les élèves. Il est à remarquer que cette ultime activité, bien qu'innovante (car inhabituelle pour eux) n'a pas posé de problème particulier aux élèves, bien au contraire – tous ont fait une proposition.

Titre :

II- La première lecture

L'ensemble des documents distribués aux élèves a été analysé, ce qui représente cinq fiches et un titre par élève soit soixante-dix fiches et quatorze titres.

Nous présentons ici les premiers résultats qui se poseront comme les bases des ajustements ultérieurs et des évolutions de nos réflexions.

II-1 Les résultats

II-1-1 Présentation générale du corpus

Cette première analyse est à vocation indicatrice. Elle nous a permis de prendre « la température du groupe » et donne des indications générales sur la qualité du corpus lui-même. En effet, malgré la position d'observateur privilégié, il ne nous a pas été possible d'affirmer avec certitude à l'issue du protocole que les élèves avaient véritablement joué le jeu et répondu aux attentes du chercheur s'agissant de l'investissement consistant à produire des représentations. Le premier sentiment à la lecture du corpus est qu'il est très « riche » de par le nombre de représentations produites, mais également de par la diversité des outils utilisés (croquis, schémas, textes, écritures symboliques des espèces, équations des transformations).

¹⁸ Celui présenté a été volontairement réduit.

Expérience N°4 A

Schématisation

l'eau de chaux devient trouble

le dioxyde de carbone passe par le tube et va dans l'eau de chaux

du cuivre apparaît à la place du dioxyde de cuivre par effet de la chaleur.

Expérience N°2 B

Schématisation

liquide bleu + hydroxyde de sodium

mâche bleue

mâche bleu-vert.

Piquide bleuté

Ci-dessus sont présentés deux extraits du corpus qui illustrent cette diversité des représentations. Nous observons, s'agissant des parties *schématisations*, une bonne appropriation des espaces disponibles (Doc A) car seul un espace¹⁹ pour tout le groupe n'a pas été renseigné. La plupart du temps les schématisations sont légendées. Les élèves utilisent souvent des choix de couleurs (Docs B/C/D) pour être au plus près des observations. Par exemple, le bleu pour l'hydroxyde de cuivre II, le noir pour l'oxyde de cuivre II, ou l'orange pour le dioxyde d'azote.

C

couple au prédominance

Bea Bunsen

substance noire (oxyde de cuivre et hydroxyde de cuivre)

coule

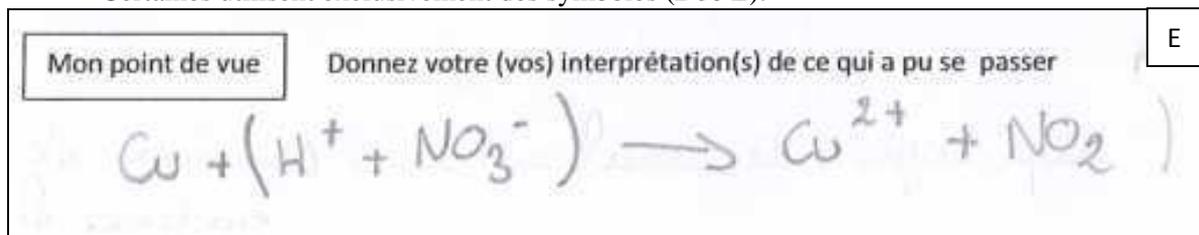
D

← dioxyde d'azote

¹⁹ Une feuille A4 par expérience comporte trois espaces (Schématisation-Mes observations-Mon point de vue).

Nous notons également des représentations qui réinvestissent des données du tableau-guide distribué, par les écritures symboliques avec des tentatives d'écritures de transformations chimiques.

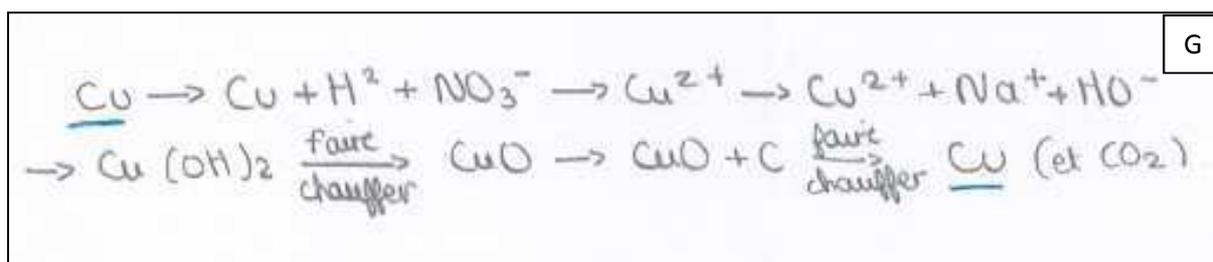
- Certaines utilisent exclusivement des symboles (*Doc E*).



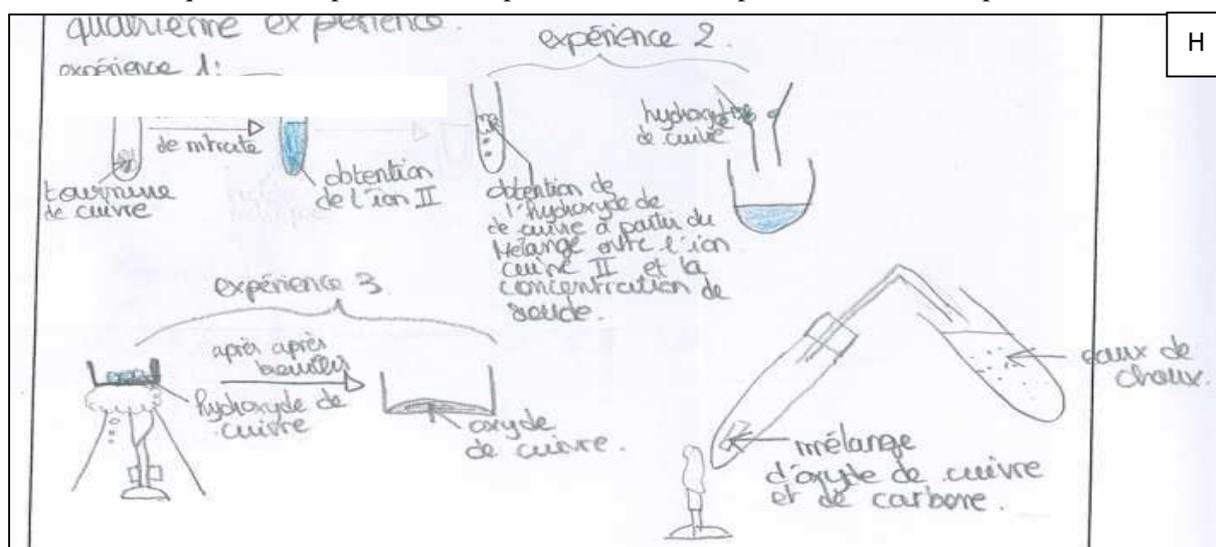
- Certaines utilisent un langage mixte alternant symboles et textes (*Doc F*).

Ensuite ces ions cuivre, au contact de l'hydroxyde de sodium (créé de l'hydroxyde de cuivre : pas cuivre + soude = $\text{Cu} + \text{HO}$ $\approx \text{Cu}(\text{OH})_2$	F
---	---

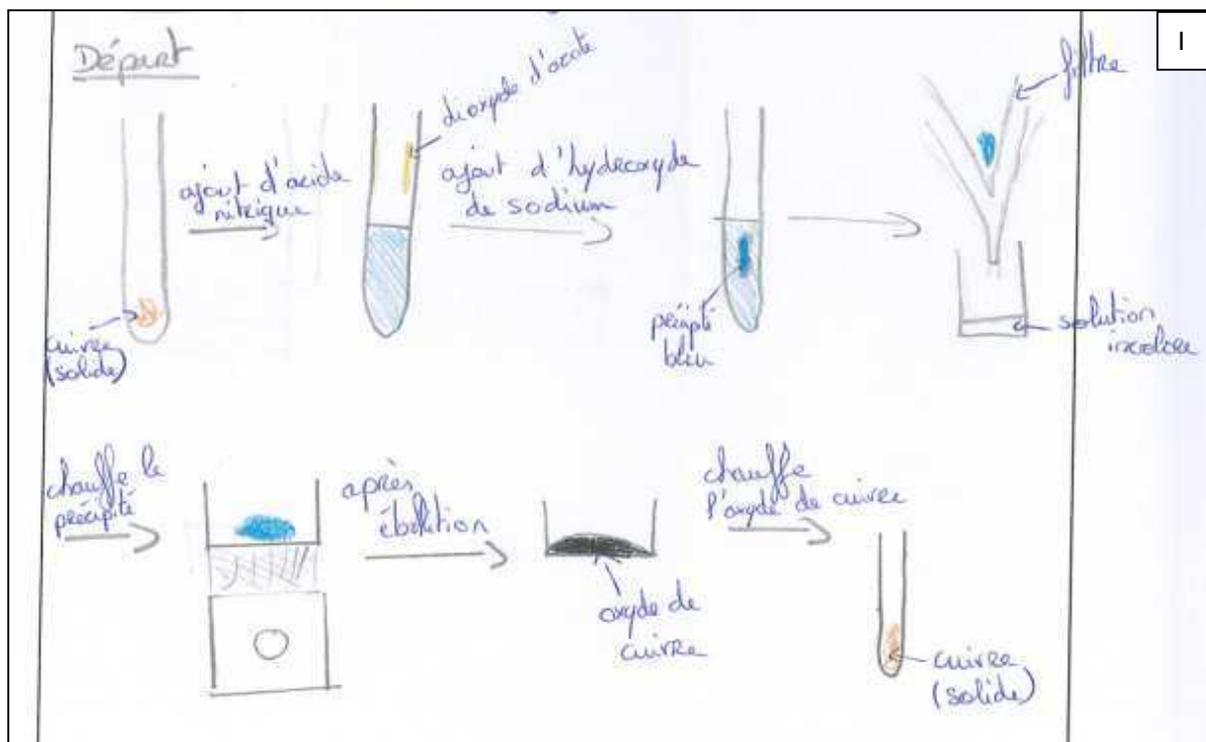
- Certaines utilisent des symbolisations enchaînées reprenant ainsi l'ensemble des transformations du protocole (*Doc G*).



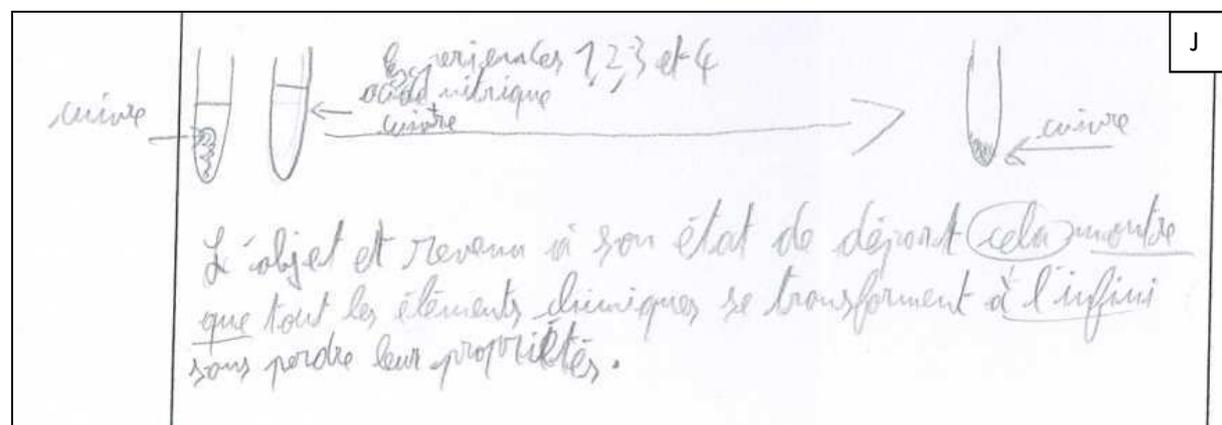
Il semble que le tableau qui collationne les données sur les différentes espèces mises en jeu ait permis non seulement des identifications, mais aussi ait participé aux élaborations des diverses écritures proposées. À première vue, il paraît possible d'avancer que cet ensemble de *signifiants* puisse, si ce n'est simplifier, pour le moins chez certains, faciliter l'expression de leur représentation des phénomènes. Nous avons par ailleurs des croquis, des dessins ainsi que des signifiants moins spécifiques à la chimie mais tout aussi riches de sens, comme des accolades (*Docs H et K*). Ci-dessous (*Doc H*) les accolades et les flèches ne sont pas systématiques et l'ensemble paraît manquer de cohérence : la quatrième expérience n'est pas identifiée et les produits formés non plus.



Ci-dessous (*Doc I*) la représentation est plus cohérente avec une utilisation claire des flèches qui traduisent une action réalisée lors du protocole expérimental (ajout d'une solution, chauffage) tout en facilitant une lecture générale horizontale implicite de gauche à droite.



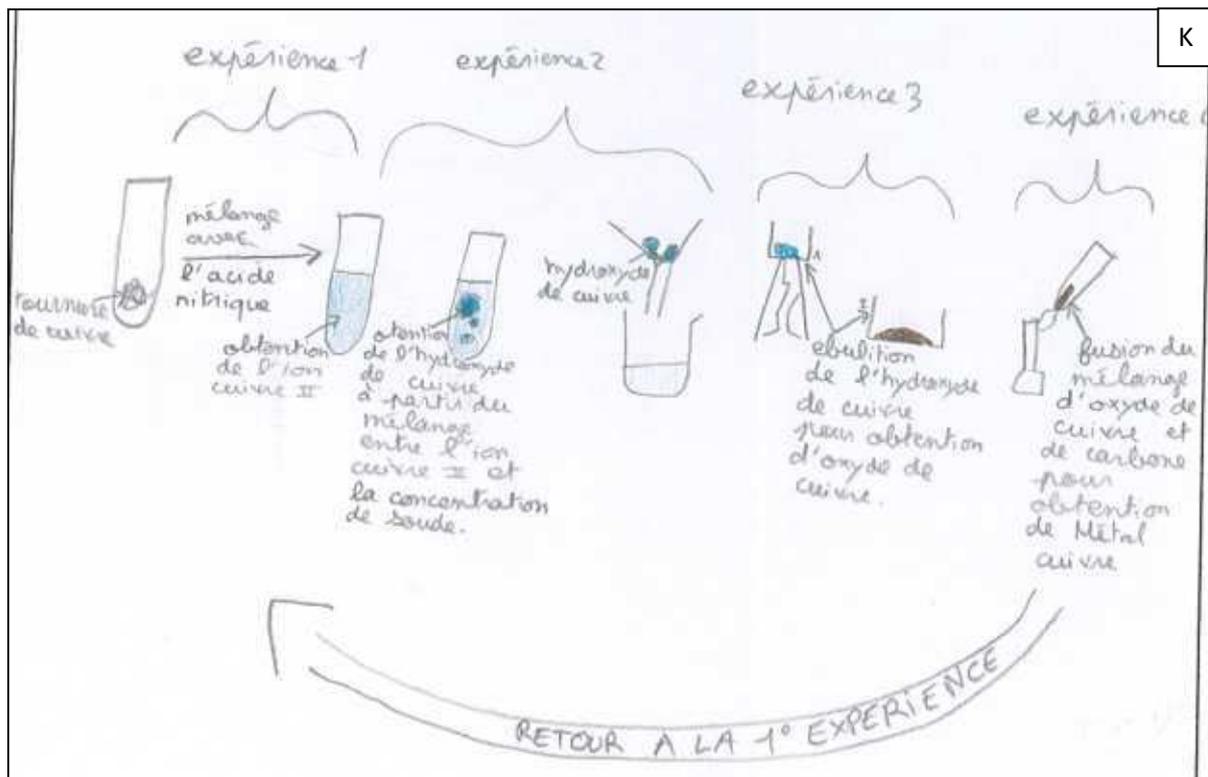
Ci-dessous (*Doc J*), le schéma est ici un résumé du protocole, mettant l'accent sur la redondance de l'espèce de départ et d'arrivée: le métal cuivre. La flèche symbolise alors l'ensemble des transformations (« ...les expériences 1, 2, 3, et 4 »).



Les flèches jusqu'ici sont utilisées dans leur fonction de « légende » ou de symbolique de l'expérience : ce qui se passe entre le début et la fin de la transformation. Dans le document suivant (*Doc K*), nous avons une autre signification de la flèche plus aboutie encore sur le plan cognitif car s'apparentant à une R2.

Page suivante (*Doc K*), nous avons une représentation qui présente un lien entre deux expériences successives car les accolades les unissent contrairement au (*Doc H*) où elles les différencient. Par ailleurs, il y a un souci évident de renforcer ce lien par un choix de couleur spécifique pour les espèces contenant l'élément cuivre qui seules sont présentes (ce qui amorce l'idée de continuité de la présence de l'élément cuivre).

Enfin, contrairement aux flèches précédentes, celle intitulée : « Retour à la 1^o expérience » témoigne d'un indice supplémentaire vers l'idée de boucle réactionnelle (et amorce de fait l'idée de conservation).



S'agissant des titres proposés par les élèves en toute fin de séance, ils laissent entrevoir des niveaux d'appropriation du concept qui sont très divers. En sortant de la salle, les élèves ont manifesté l'intérêt qu'ils avaient porté à ce dernier travail, tout en mettant l'accent sur une sorte de frustration d'avoir dû faire des choix de mots. Il est à noter que, pour écrire ces titres, les élèves ne disposaient plus de leurs travaux antérieurs car l'ensemble de leur représentation avait été ramassé. Sur quatorze titres, le mot « cuivre » est utilisé quatorze fois mais n'est présent que dans dix. Quatre titres n'utilisent donc pas le mot « cuivre », alors que quatre l'utilise par deux fois. Nous remarquons enfin que les formes proposées sont notablement différentes.

L'un d'entre eux (*Doc L*) reprend une célèbre phrase de Lavoisier (vraisemblablement vue au collège).

« Rien ne se perd rien ne se crée tout se transforme »

Certains, (*Docs M, N et O*) présentent des indices favorables (voire très favorables) à la construction du concept. Les termes « boucle » - « conservation » - « formes » sont des mots qui trahissent une dynamique cognitive en marche vers le concept.

la boucle des réactions chimiques entre les éléments.

Le cuivre sous différentes formes.

La conservation des éléments chimiques (Cuivre) O

Quelques titres (*Doc P*) sont plus « énigmatiques » et font la part belle à l'implicite. Ici les utilisations des pointillés, d'une part, et du point d'exclamation, d'autre part, interrogent fortement²⁰ sur ce qui se cache derrière ces signifiants (devenus signifiés).

Du cuivre ... Au cuivre ! P

Enfin des titres peuvent laisser penser que le concept est peut-être en cours de construction (« Regroupement » *Doc Q*) ou vraisemblablement pas construit tant des indices défavorables sont apparents (« Disparition » - « Réapparition » *Doc R*).

Regroupement d'expériences sur la formation du Métal Cuivre. Q

disparition et réapparition du cuivre / plusieurs états du cuivre R

Ce premier état des lieux réalisé nous a conduits à construire pour chaque élève un tableau (ci-dessous) faisant apparaître un premier repérage des indices favorables et défavorables à l'émergence du concept par analyse de contenu pour les trois parties : *Expérimentations* / *Bilan-Synthèse* / et *Titre*. Les indices favorables sont ceux qui approchent les idées de continuité de présence et de conservation lors d'une transformation. Y figure également une tentative d'interprétation des représentations de l'élève.

Élève H	Indices favorables	Indices défavorables	Analyse interprétative
Expérimentations			
EXP1	Ecriture de la transformation faisant apparaître les invariances des éléments Cu – N – O $\text{Cu} + (\text{H}^+ + \text{NO}_3^-) \rightarrow \text{Cu}^{2+} + \text{NO}_2$	Absence de la conservation de l'élément H	Tentative d'écriture de la transformation – la conservation de l'élément H est difficile à établir par l'impossibilité à pouvoir observer la formation de l'eau
EXP2	Le solide bleu est de l'hydroxyde de cuivre – « le filtrat est un mélange d'acide nitrique et de solution de soude »		Il y a une tentative d'identification implicite de la présence de l'élément cuivre au sein du seul précipité - Le raisonnement s'appuie sur la différence de couleur des espèces chimiques (bleue-incolore)

²⁰ Nous relaterons la teneur de l'entretien « à chaud » que nous avons eu avec l'élève ayant proposé ce titre.

EXP3	Le chauffage du précipité le fait devenir noir – l'oxyde de cuivre est un produit de la réaction – le gaz est du dioxyde de carbone	Le précipité s'évapore – la température d'ébullition du précipité	Présence de l'élément cuivre par l'identification du solide noir comme étant de l'oxyde de cuivre qui est un produit de la réaction chimique – le gaz formé ne contient pas l'élément cuivre – il y a confusion entre changement d'état de l'eau et du précipité
EXP4	L'oxyde de cuivre est devenu rouge-orangé c'est du cuivre – on a fait une boucle - on peut retrouver l'élément sous sa forme première	Un élément peut réagir avec d'autres éléments et se transformer –	Identification de l'élément cuivre sous forme métal – idée de continuité et de conservation non explicite
Bilan-Synthèse			
	Boucle – La schématisation est décrite en continue avec un fléchage gauche-droite	...à force de réactions, on a retrouvé le cuivre	Idée selon laquelle la persévérance finirait par « payer » ; les transformations sont à l'origine de la boucle – idée de continuité tout au long des différentes expériences (première et dernière schématisations identiques) – l'élément cuivre est présent à toutes les étapes de manière lexicale sauf pour Cu^{2+} et $\text{Cu}(\text{OH})_2$ qui sont identifiés par des codes de couleur.
Titre			
<i>La boucle des réactions chimiques entre les éléments</i>	La notion de boucle	L'importance des transformations	Tentative de recherche de lien entre boucle-transformations et éléments – ici ce sont peut-être les transformations chimiques qui prennent le pas sur les éléments.

Un tableau récapitulatif des indices favorables et défavorables à l'émergence du concept pour un élève

Ces quatorze tableaux²¹ nous donnent des renseignements sur l'appropriation du concept d'élément chimique. Pour autant, le choix de vouloir identifier des indices favorables et des indices défavorables va rapidement s'avérer peu probant. En effet, il est difficile dans ces conditions de pouvoir « dire » où en est vraiment un élève, au bout du compte, à l'issue de cette analyse.

Qui l'emporte des deux familles d'indices ? Ces indices sont-ils hiérarchisables ? Un indice défavorable remet-il en question tous les favorables exprimés ?

II-1-2 Exploitation du corpus à partir des représentations produites

Il nous apparaît indispensable à la vue de la complexité que revêt le corpus de revenir sur des bases solides ancrées sur un outillage théorique clair.

²¹ Donnés en annexe avec l'ensemble du corpus « 24 rural ».

C'est ainsi que nous poursuivons l'analyse du corpus en nous appuyant sur la catégorisation R1/R2/R1-R2 des représentations pour pouvoir distinguer ses différents attributs.

Nous avons procédé à l'analyse exhaustive des représentations des élèves.

Nous donnons trois tableaux pour chaque catégorie. Le premier donne des exemples extraits issus du corpus qui illustre la catégorie (voir page suivante pour la catégorie des R1).

Le second présente pour chaque élève la répartition de ses représentations au cours du protocole.

L'idée est ici d'obtenir une lecture cognitive individuelle dans un environnement donné ; le troisième propose la même répartition pour le groupe entier avec les moyennes atteintes pour chaque étape (expérience). L'idée est ici de se donner les moyens d'obtenir une lecture cognitive collective qui puisse, entre autres, être mise en relation avec les attendus didactiques de l'enseignant.

II-1-2-1 Bilan général des R1

Les représentations R1 doivent permettre aux élèves de réaliser un premier repérage des observables ; si les cibles – *les espèces contenant l'élément cuivre* – sont attendues en terme de R1, celles ne contenant pas l'invariant peuvent également participer à sa construction. En effet l'invariant se construit pour une part par des repères d'indices invariables au regard de ceux qui varient. Repérer un invariant s'effectue dans un champ de variables faisant de lui un objet singulier. En cela, le protocole propose deux catégories distinctes d'espèces chimiques, celles contenant l'élément chimique cuivre et celles ne le contenant pas.

<u><i>In situ dans le corpus</i></u>	<i>R1</i>
N° de l'expérience ou bilan-synthèse (B)	
1	<i>Le cuivre se fragmente</i>
	<i>Le cuivre effervescent</i>
	<i>Petites bulles comme un cachet effervescent</i>
	<i>Un gaz marron qui se diffuse</i>
2	<i>Un précipité bleu en forme de nuage</i>
	<i>Ça ressemblait à de la méduse</i>
	<i>Une masse gélatineuse s'est formée</i>
	<i>On remarque des paquets sombres sur ce filtre</i>
3	<i>En forme de coton ou de nuage</i>
	<i>Il devient visqueux</i>
	<i>Le précipité a cramé</i>
	<i>On entend un crépitement</i>
	<i>Il est devenu sec comme cramé</i>
	<i>Ça ressemble à de la rouille noire</i>
4	<i>Avec un reflet orangé</i>
B	<i>La méduse filtrée est l'hydroxyde de cuivre</i>

Ci-dessus quelques représentations sur l'élément cuivre de type R1 repérées dans le corpus

Certaines représentations R1 repérées dans le corpus sont plus particulièrement « imagées » (« méduse » – « gélatineux » – « nuage » – « cachet effervescent »...).

La très grande majorité des représentations R1 sont produites sur chaque fiche dans la zone intitulée « *Mes observations* » ce qui est en ligne avec ce que nous attendions. Cet espace est bien investi par la majorité des élèves.

Nous décidons de dissocier les R1 qui s'adressent directement aux différentes espèces qui contiennent l'élément cuivre, à savoir :

R1(a)	{	Cu	métal cuivre réactif de la première expérience
		Cu ²⁺	ion cuivre(II)
		Cu(OH) ₂	hydroxyde de cuivre (II)
		CuO	oxyde de cuivre(II)
		Cu	métal cuivre produit de la quatrième expérience

lesquelles seront codées **R1(a)**, des R1 qui s'adressent à des espèces ne contenant pas l'élément cuivre (comme par exemple NO ; NO₂ ; H₂O ; CO₂) qui, elles, seront codées **R1(b)**.

Remarques :

Tout extrait d'un protocole d'élève sera codifié par [...]

Tout extrait d'une conversation au sein d'un groupe sera codifiée par [« »]

Voici un extrait du corpus illustrant les deux sous-catégories **R1(a)** et **R1(b)**.

[..En chauffant l'oxyde de cuivre, l'eau de chaux devient trouble (R1(b)) et on a un dépôt qui devient orangé (R1(a)).]

Bilan du groupe	R1(a)	R1(b)	Total R1
<i>Expérience 1</i>	27	21	48
<i>Expérience 2</i>	23	16	39
<i>Expérience 3</i>	31	15	46
<i>Expérience 4</i>	12	17	29
<i>Les bilans</i>	/	1	1
Total (Moy/él)	93 (6,6)	70 (3,5)	163 (11,6)

Bilan des R1 au sein du corpus pour le groupe

- Les représentations images R1 sont très présentes au sein des comptes rendus (une dizaine en moyenne par élèves (11,6 exactement) ; les trois cinquième environ (93/163 ≈ 57%) concernent directement les espèces contenant l'élément cuivre, codées par R1(a) dans le tableau précédent, et les deux cinquième restant concernent des espèces chimiques ne contenant pas l'élément chimique cuivre, codées R1(b).

- Les résultats de la première expérience font apparaître l'intérêt des élèves à vouloir s'exprimer tant sur l'espèce gazeuse colorée (NO₂) (21 R1(b)) que sur la coloration de la solution (Cu²⁺) et la consommation du métal (Cu) (27 R1(a) en cumulées).

Si tous les élèves ont décrit, par la mention de la couleur bleue, la formation des ions cuivres (II), la lecture des comptes rendus laisse apparaître des confusions entre changements d'états et dissolution, d'une part, et états solides et liquides d'autre part. Les obstacles, ici, sont nombreux et les sources

d'erreurs récurrentes mais ces obstacles entrent dans la dynamique R1-R2 et seront abordés dans ce cadre.

[... le liquide qui est incolore au départ devient de plus en plus bleu...][...la solution a commencé à devenir bleue.]

- Cette seconde expérience fait la part belle au précipité d'hydroxyde de cuivre II, $\text{Cu}(\text{OH})_2$ dont la nature et l'état ont très fortement interrogé les élèves (23 R1(a)) mais la nature du filtrat les aura également intrigués (16 R1(b)).

La description du précipité a été plus difficile, les élèves réalisant cette filtration pour la première fois. Mon interview sur l'instant de certains d'entre ceux qui étaient soit dans l'hésitation, soit dans l'incompréhension apparente, m'amène à penser que l'aspect obtenu dans le papier filtre (*Cf. tableau de données à ce sujet*) n'est pas interprété comme pouvant être « solide ». Cet état n'est pas identifié comme tel, alors que le cristal, lui, est bel et bien associé à cet état de la matière dans le tableau fourni aux élèves. Il nous semble qu'il y a ici un obstacle dans l'inadéquation visuelle entre l'état annoncé par le document et celui (ceux) supposé(s) au sein du papier filtre (le mélange est constitué de deux phases, solide et liquide dont la dernière s'écoule lentement par les pores du papier filtre)

[« c'est comme une méduse »] [« on dirait de la gélatine »][«c'est quoi comme matière ? »]

La technique de filtration, par ailleurs, a été approximativement réussie dans certains groupes, ce qui aura participé à la confusion, l'élément cuivre se retrouvant *in fine* dans le papier filtre et parfois également dans le filtrat (qui avait une teinte bleutée):

[« c'est passé à travers »] [« on l'a pas bien fait tu crois »] [« regarde les autres c'est blanc »] [« c'est parce que tu l'as jeté trop fort »] [« oui mais il était collé au tube »]

Par ailleurs, de nombreuses représentations R1 *par analogie*, sont évoquées par les élèves dont certaines visent le précipité d'hydroxyde de cuivre II : *[...il est gélatineux...]* ; *[...ça ressemblait à de la méduse ...]* ; *[...un précipité bleu en forme de nuage...]*

- La troisième expérience se focalise davantage sur le solide (CuO) avec (31 R1(a)) au détriment des gouttelettes d'eau observables (H_2O) avec (15 R1(b)).

La description de l'oxyde de cuivre II (CuO) ne semble pas avoir posé de difficulté apparente; tous les élèves parviennent à le décrire comme un solide noir qui se forme au fur et à mesure de l'expérience ; ainsi on peut noter que la texture au sein du creuset est moins controversée ; en effet le changement d'état observé de la condensation de la vapeur d'eau en eau liquide a sans doute renforcé la nature de l'état du composé produit « noir » et facilité ainsi son repérage. Pour autant, certains confondent CuO avec le carbone C.

[...à la fin de l'expérience, il ne reste que de la poudre noire, le peu qui reste est solide...]

[...ce qui reste est sec...on a obtenu un solide noir...] [...il a cramé...]

- La quatrième et dernière expérience révèle un intérêt majoritaire pour la description du trouble de l'eau de chaux (connaissance réinvestie du collège sur la caractérisation de CO_2) avec (17 R1(b)) au détriment de la formation de l'espèce de départ (Cu) qui se dépose sur les parois du tube à essais, avec (12 R1(a)).

Si le trouble de l'eau de chaux est convenablement et très souvent décrit, le dépôt sur les parois du tube à essais ne l'est pas de manière consensuelle.

[...au fond du tube à essais la poudre devient rose...] *[...à la fin de l'expérience au fond du tube à essais il reste des résidus de couleur orangée...]* *[...un solide rouge-orangé...]*

Pour certains élèves, le dépôt est un solide, pour d'autres, sa nature reste encore aléatoire. Les appréciations colorées, bien que diverses, restent toutefois dans une gamme convergente.

Nous constatons que la dernière expérience est le siège du plus petit nombre de représentation R1(a), ce qui n'est pas *a priori* très rassurant si l'on part de l'idée que l'identification du métal cuivre à ce moment du protocole est essentiel.

ÉLÈVE	R1 (a)	R1 (b)	(a/a+b)
A	9(2241)	8(3212)	53%
B	7(2131)	12(2442)	37%
C	6(2121)	7(2212)	46%
D	10(3331)	7(3121)	59%
E	<u>6</u> (2211)	<u>2</u> (1001)	63%
F	8(2222)	4(10021)	75%
G	7(1231)	3(1101)	70%
H	7(3121)	5(2111)	58%
I	5(212)	2(011)	71%
J	6(1221)	5(2012)	54%
K	5(212)	3(111)	62%
L	6(2121)	4(1111)	60%
M	3(111)	2(011)	60%
N	8(2321)	6(2112)	57%
MOYENNE	6,6	5	57%

Bilan des R1 au sein du corpus pour le groupe

Ce tableau présente le bilan des représentations R1 des élèves. Entre parenthèses sont indiqués, quand il y en a, les nombres de représentations R1 au cours des expériences et du bilan (le premier chiffre indiqué dans les parenthèses renvoie toujours à l'expérience 1). L'élève **E** a construit 6 représentations R1(a) et 2 de type R1(b) ce que nous écrirons **R1[6/2]**. Cet élève n'a pas construit de représentation R1 dans son bilan et les 2 R1(b) l'ont été lors de la première et quatrième expérience.

Il est également mentionné la proportion de représentations R1(a) par rapport au total des représentations produites. Cette proportion en faveur de l'élément cuivre varie d'un facteur deux pour les extrêmes (37% pour l'élève **B** à 75% pour l'élève **F**, soit 57% en moyenne pour le groupe) ce qui pourrait présager d'une différence notable *in fine* dans la construction du concept. Nous faisons le constat qu'une proportion importante de représentations R1 porte sur des espèces chimiques qui ne possèdent pas l'élément cuivre (25% pour l'élève **F** à 63% pour l'élève **B**, soit 43% en moyenne pour le groupe).

Ces divers résultats montrent que la très grande majorité des élèves a produit des R1 sur l'ensemble des expériences ; celles-ci sont majoritairement liées à des espèces chimiques qui mettent en jeu l'élément chimique cuivre. Les couleurs utilisées pour décrire les différentes espèces chimiques sont tout à fait cohérentes avec les observations attendues. De manière générale, l'investissement du groupe à construire des représentations R1 en nombre est un indicateur que nous jugeons *a priori* favorable dans la perspective de l'émergence de l'invariant et de la construction du concept.

II-1-2-2 Bilan général des indices R2

La première lecture du corpus nous a semblé riche sur le plan de la qualité des raisonnements produits. Sallaberry propose, s'agissant des représentations R2, d'utiliser les critères de déclenchement suivants pour les repérer :

- la présence d'un connecteur logique (parce que, donc...)
- la trace d'une comparaison
- le démarrage d'une hypothèse ou d'une amorce de raisonnement

Ces critères ont pour vocation de guider de manière objective vers le repérage de représentations à visées interprétatives.

Dans cette analyse, les critères seront, étendus (temps employés, nature des figures de styles) et dissociés (Hypothèses et indicateurs d'hypothèses d'une part, tentative d'explication et amorce de raisonnement d'autre part, distinction dans les connecteurs logiques). Ceci nous amène à utiliser une nouvelle catégorisation élargie suivante :

- la présence d'un connecteur logique : conjonction de coordination (codé **Cc**) ou de toute autre nature (conjonction de subordination, adverbe,...) (codé **Ac**)
- l'utilisation de temps spécifiques : conditionnel présent (codé **Cl**), subjonctif présent (codé **Sf**), participe présent (**Pp**)
- la présence d'une figure de style (codé **Fs**)
- la présence d'une expression qui débouche sur une tentative d'explication ou qui relève d'un raisonnement (codé **Te-R**)
- une hypothèse ou des indicateurs d'hypothèse (codé : **Hy**).

Pourquoi une telle volonté d'affinement ? Pour nous donner les moyens d'être munis de balises plus fines afin de nous aider à mieux distinguer les différences de natures entre les représentations.

Le choix de la prise en considération des temps employés est en cela significatif. En effet, les emplois du conditionnel et du subjonctif indiquent que l'élève est dans une attitude de mise en relation d'événements. Par ailleurs, le participe passé indique, par exemple, une prise de conscience d'un déroulement chronologique qui interroge ou sur lequel l'élève s'appuie pour raisonner. Dans les deux cas, il y a bien un travail cognitif qui est engagé pour tenter de mieux comprendre ou mieux se faire comprendre. Ce travail est interprétatif et possède génétiquement les attributs d'une R2. Voici quelques extraits du corpus pour illustrer l'ensemble des nouvelles catégories de critères favorables aux R2.

[En effet (Te-R), tout comme l'huile dans l'eau (Fs), il est probable(Hy) que l'ion cuivre II ne puisse pas(Sf) se diluer avec la solution concentrée.....].
 [..Il n'y a donc (Cc) plus d'oxygène dans l'oxyde de cuivre. Or (Cc), l'oxyde de cuivre se base avec le cuivre et l'oxygène. Ainsi(Ac), le cuivre réapparaît sans Oxygène].
 [Normalement (Ac), le filtrat obtenu aurait dû (Cl) être transparent, je pense (Hy) donc (Cc) que l'on n'a pas mis assez (Ac) d'hydroxyde de sodium.]
 [L'oxygène ayant disparu (Pp,) l'oxyde de cuivre à forte température devient ou (Hy) redevient métal cuivre car (Cc) ce qui est obtenu dans le tube à essai a une couleur orangée]

Toujours dans cette logique de vouloir construire des outils plus fins, nous décidons de dissocier les indices favorables aux R2 de ceux, qui sont plus particulièrement susceptibles d'approcher l'invariant codés **R2(c)** et qui regroupent les critères (Te-R et Hy), des indices moins spécifiques bien que favorables, regroupant les autres critères (Cc/Ac/Fs) codés **R2(d)**. Nous considérons que les temps spécifiques retenus sont inévitablement connectés à une hypothèse ou à une amorce d'hypothèses.

Nous donnons dans les deux tableaux ci-dessous les extraits du corpus qui rentrent dans les différentes catégories retenues pour les indices R2.

R2(c)	
Te - R	Hy
..c'est à dire...	<i>J'en déduis que</i>
..donnant ainsi...	<i>C'est donc...</i>
...d'où...	..n'importe quel...
<i>En effet</i>	<i>A chaque fois...</i>
<i>Quant à...</i>	<i>En conséquence</i>
..ce qui montre...	<i>Par conséquent</i>
..à chaque fois...	<i>Avec lequel</i>
<i>Cela montre que...</i>	..à partir de...
<i>Parce que (qu'elle)</i>	...rendus compte...
..à cause de...	..comme nous le montre...
..est dû àalors que...
<i>Si bien que si...</i>	

R2(d)			
Cc	Ac	Cl/Sf/Pp	Fs
Mais	Puisque	- Conditionnel	Comparaison
Ou	Malgré / Jamais	présent	Emphase
Et	Toujours / Jusqu'à	-Subjonctif présent	Métaphore
Donc	Ainsi / Après	-Participe	(Redondance)
Or	Normalement	présent	
Car	Assez / Aussi		
	Voici		

Exemples extraits du corpus illustrant les critères retenus pour les indices R2(c) et R2(d).

ÉLÈVE \mathcal{F} (33)	R2(c)		R2(d)			
	Te-R	Hy	Cc	Ac	Cl / Sf / Pp	Fs
Expérience 1	/	2	1	2	/	/
Expérience 2	1	/	/	/	1	/
Expérience 3	2	1	1	2	1	1
Expérience 4	2	4	1	/	/	/
Mon bilan	1	1	4	1	3	1
TOTAL	6	8	7	5	5	2

Répartition des indices R2 pour le corpus d'un élève

Nous avons construit un tableau par élève qui relève l'ensemble des indices favorables aux R2 par critères retenus. L'élève \mathcal{F} a utilisé 14 (6+8) indices favorables R2(c) et 19 (7+5+5+2) de type R2(d) ce que nous pourrions écrire par le code suivant : **R2[14/19]**, pour un total de 33 indices L'analyse des indices pour les R2 au sein du groupe d'élèves permet d'observer leur répartition au sein des comptes rendus. Tous les critères retenus sont utilisés mais de manière très inégale. Les figures de style (Fs) sont les moins présentes ce qui semble logique au vue de la situation (les élèves sont en TP de Sciences Physiques). On note l'utilisation prépondérante des comparaisons, de quelques emphases, métaphores et redondances.

[...ces 4 expériences correspondent en quelque sorte à une « boucle ».]

De nombreuses conjonctions de coordination (Cc) et de subordination (Ac) jalonnent de manière importante les textes des élèves. Ce sont généralement les éléments de langage les plus utilisés pour construire des liens de causalité.

[..Il n'y a donc (Cc) plus d'oxygène dans l'oxyde de cuivre. Or (Cc), l'oxyde de cuivre se base avec le cuivre et l'oxygène. Ainsi (Ac), le cuivre réapparaît sans Oxygène].

Si le « présent » est le plus employé, le conditionnel (Cl) comme le subjonctif (Sf) sont parfois utilisés ainsi que le participe présent (Pp). Ces temps révèlent explicitement une mise à distance entre l'observable et l'interprétation.

[Normalement (Ac), le filtrat obtenu aurait dû (Cl) être transparent, je pense (Hy) donc (Cc) que l'on n'a pas mis assez (Ac) d'hydroxyde de sodium.]

Des indicateurs fortement récurrents comme les tentatives d'explications (Te) et les hypothèses ou indicateurs d'hypothèses (Hy) témoignent que les élèves s'interrogent et « vivent » la situation expérimentale comme une véritable investigation.

[L'oxygène ayant disparu (Pp,) l'oxyde de cuivre à forte température devient ou redevient (Hy) métal cuivre car (Cc) ce qui est obtenu dans le tube à essais a une couleur orangée]

Bilan du groupe	R2(c)		R2(d)				Total Indices R2
	Te-R	Hy	Cc	Ac	Cl / Sf / Pp	Fs	
Expérience 1	17	15	14	26	7	/	79
Expérience 2	18	15	24	30	8	2	98
Expérience 3	13	10	30	25	3	4	85
Expérience 4	26	12	33	16	7	1	95
Les bilans	42	10	20	30	6	6	115
Total (Moy/él)	116 (8,3)	62 (4,4)	121 (8,6)	127 (9,1)	31 (2,2)	13 (0,9)	470 (33,5)

Bilan de la répartition des indices R2 au sein du corpus pour le groupe

Le tableau général ci-dessus nous montre qu'il existe un accroissement important des indices favorables R2(d) lors de l'expérience N°4 (la dernière) qui est de +31% par rapport au total moyen des indices des trois premières expériences (ce qui s'observe aussi sur l'exemple de l'élève \mathcal{F} – Cf. tableau page précédente). Ceci pourrait s'expliquer par le caractère « spectaculaire » de la formation du métal cuivre présent au départ qui invite à une forte interrogation. Il semble « qu'il se soit passé quelque chose d'important » à ce moment-là pour une forte majorité des élèves. Les interpellations prises « à la volée » au sein de quelques groupes (G1 à G4) en témoignent :

G1 « ça s'est reformé »- « on a fait un cycle » – « on est revenu au départ »

G2 « il y a comme de la rouille » - « non la rouille c'est avec de l'eau et du fer »

G3 « c'est du cuivre » - « il était toujours là » - « mais non on l'a au début et à la fin c'est tout » « mais si à chaque fois il est là » (mime chaque étape avec les mains en les faisant tourner les unes autour des autres)

G4 « à la fin on est revenu à l'élément du début » – « c'est un cercle vicieux »- « on est pas sûr que c'est du cuivre »

ÉLÈVE	R2(c)	R2(d)	(c/c+d)
\mathcal{A}	15	25	37%
\mathcal{B}	12	30	28%
\mathcal{C}	17	41	28%
\mathcal{D}	18	20	47%
\mathcal{E}	6	9	40%
\mathcal{F}	14	19	42%
\mathcal{G}	15	14	51%
\mathcal{H}	7	13	35%
\mathcal{I}	10	11	47%
\mathcal{J}	11	11	50%
\mathcal{K}	16	19	45%
\mathcal{L}	15	30	33%
\mathcal{M}	13	17	43%
\mathcal{N}	9	32	22%
MOYENNE	12,7	20,8	38%

Bilan des indices R2 au sein du corpus pour le groupe

On peut noter qu'un nombre important d'indices favorables aux R2 ont été repérés (une trentaine en moyenne par élève : 33,5 (12,7 + 20,8)) ce qui atteste d'un réel engagement pour expliquer, argumenter. Les relations de causalités sont particulièrement présentes ; elles sont un premier niveau de réflexion. Le raisonnement, l'émission d'hypothèses, toutes les tentatives d'explications sont autant

d'indices favorables à l'émergence de l'invariant et traduisent un niveau supérieur de la pensée. On remarque que ces derniers R2(c) représentent plus du tiers (38%) du total des indices. En outre, la répartition des indices spécifiques au sein du corpus est assez marquée ; en effet, la dernière expérience et le bilan présentent les deux plus forts totaux de représentations spécifiques. Ce résultat révèle l'importance de la construction du protocole lequel, par la formation du métal cuivre *in fine*, aura très fortement interrogé les élèves en les invitant à « trouver » une explication à cette observation.

II-1-2-3 Bilan général des coordinations R1-R2

Les coordinations R1-R2 sont des représentations qui sont d'excellents indicateurs du niveau d'interprétation d'un sujet. Elles mêlent à la fois description et interprétation dans une saine dynamique où les unes nourrissent les autres et réciproquement. Ainsi, à chaque fois qu'une espèce chimique est identifiée, nous pouvons admettre qu'elle ne peut l'être qu'à partir d'un raisonnement intérieur à « valeur ajoutée » cognitive. Il faut associer un état de la matière, une couleur, un aspect à un nom (un symbole parfois). Ces représentations sont les plus « simplistes » dans les R1-R2 rencontrés.

D'autres se construisent par liens de causalité et d'interprétations déductives ou hypothétiques ce qui nous semble d'autant plus significatif. Certains élèves de par leurs émissions d'hypothèses parviennent véritablement à se lancer dans un prédictif salutaire, en ce sens qu'ils se construisent de véritables mécanismes de la pensée.

Nous donnons ci-dessous au cours du protocole quelques exemples de représentations qui coordonnent R1 et R2.

N° de l'expérience ou bilan-synthèse (B)	R1-R2
1	<i>Je pense que ces ions se sont formés car le métal a totalement disparu.</i>
	<i>Un gaz roux s'émane, NO₂, qui est peut être dû à la dissolution du métal cuivre ce qui peut donner cette couleur orangée.</i>
2	<i>J'en déduis que certains ions Cu²⁺ du départ se sont transformés en hydroxyde de cuivre à cause de l'ajout d'hydroxyde de sodium.</i>
	<i>Normalement le filtrat obtenu aurait dû être transparent, je pense donc que l'on n'a pas mis assez de hydroxyde de sodium.</i>
3	<i>Comme ils ont une couleur sombre je dirais que c'est de l'oxyde de cuivre</i>
	<i>Le liquide contenant l'hydroxyde est devenu noir et disparaît un peu car il fait une réaction à la chaleur.</i>
4	<i>À mon avis le mélange d'oxyde de cuivre et de graphite sous la chaleur a permis de recréer du métal cuivre</i>
	<i>La poudre de couleur rouillée ne peut pas être la rouille parce que la rouille se forme qu'avec le fer.</i>
B	<i>L'objet est revenu à son départ cela montre que tous les éléments chimiques se transforment à l'infini sans perdre leur propriété.</i>
	<i>Pour moi cette expérience sert à montrer qu'un élément chimique au cours de nombreuses transformations est toujours conservé.</i>

Bilan du groupe	R1-R2 (e)	R1-R2 (f)	Total R1-R2
<i>Expérience 1</i>	24	6	30
<i>Expérience 2</i>	31	3	34
<i>Expérience 3</i>	28	5	33
<i>Expérience 4</i>	32	15	47
<i>Les bilans</i>	51	1	52
Total (Moy/él)	166 (11,9)	30 (2,1)	196 (14)

Comme pour les R1 et les indices R2, nous faisons le choix de distinguer les coordinations qui ciblent l'élément chimique cuivre, codées **R1-R2(e)**, de celles codées **R1-R2(f)**, qui ciblent d'autres espèces chimiques. Ainsi, les représentations de l'élève A seraient codées : **R1-R2[12/3]**.

ÉLÈVE	R1-R2 (e)	R1-R2 (f)	(e/e+f)
<i>A</i>	12(31314)	3(1002)	80%
<i>B</i>	20(23447)	2(2)	91%
<i>C</i>	16(24334)	1(0001)	94%
<i>D</i>	16(34342)	4(0112)	80%
<i>E</i>	8(12113)	2(0011)	80%
<i>F</i>	17(32345)	1(0001)	94%
<i>G</i>	8(12113)	2(1001)	80%
<i>H</i>	10(11233)	3(0111)	77%
<i>I</i>	8(13022)	2(0002)	80%
<i>J</i>	7(11113)	3(1101)	70%
<i>K</i>	9(12213)	3(1011)	75%
<i>L</i>	11(22115)	1(0001)	92%
<i>M</i>	8(13211)	2(0011)	80%
<i>N</i>	16(21256)	1(00001)	94%
MOYENNE	11,9	2,1	85%

Bilan des R1-R2 au sein du corpus pour le groupe

La lecture croisée des deux tableaux précédents nous montre une fois de plus que l'expérience 4 se pose comme la plus féconde en représentations, ici en coordinations R1-R2 (47 au total dans le premier tableau de la page précédente). Par ailleurs, les bilans comportent une très forte proportion (51 sur 52) de R1-R2(e) pour ainsi dire « exclusivement » ciblées sur l'élément chimique cuivre. La proportion moyenne des R1-R2(e) est de 85% allant jusqu'à 94% pour deux élèves, ce qui est particulièrement élevé. Nous observons une faible quantité de coordinations ciblées sur des espèces chimiques ne concernant pas l'élément cuivre R1-R2(f) alors que les représentations R1 sur ces mêmes espèces étaient importantes. Ceci pourrait vouloir dire que les élèves ont perçu la finalité du protocole qui était centré sur l'élément cuivre.

Nous allons maintenant apprécier l'identification des espèces chimiques qui contiennent l'élément cuivre pour chaque élève (quatorze au total).

Espèces non identifiées	(Avant le bilan)	(Après le bilan)
$\text{Cu}(\text{OH})_2$	7	1
$\text{Cu}(2)$	5	0

Bilan de l'identification des espèces chimiques qui contiennent l'élément cuivre.

- $\text{Cu}(2)$ est le symbole que nous attribuons au métal cuivre produit lors de la dernière expérience du protocole.
- $[\text{Cu}(\text{OH})_2]$ est le symbole de l'hydroxyde de cuivre II lequel n'est pas identifié pour cinq des élèves avant le bilan alors que tous, à une exception près, l'ont identifié à l'issue du bilan. Il est à noter que seul un tiers des élèves est parvenu à identifier toutes les espèces avant d'aborder le bilan. Ce constat n'est pas, nous semble-t-il, de nature à favoriser l'émergence de l'invariant.

-Tous les élèves ont su identifier les ions cuivre (II). L'association $[\text{Cu}^{2+}$ - couleur bleue] est un « classique » de l'enseignement du collège et la solution de sulfate de cuivre (Cu^{2+} ; SO_4^{2-}) est une des

premières solutions ioniques qu'ils rencontrent avant d'entrer au lycée. Aussi cette coloration n'a pas surpris les élèves.

-On peut noter que la moitié des élèves ne sont pas parvenus, à l'issue de la seconde expérience à identifier la nature du précipité d'hydroxyde de cuivre (II) ; les interviews sur l'instant de certains d'entre ceux qui étaient soit dans l'hésitation, soit dans l'incompréhension apparente, nous amènent à penser que l'aspect obtenu dans le papier filtre (Cf. *tableau des R1 à ce sujet*) n'est pas interprété comme pouvant être « solide ». Cet état n'est pas identifié comme tel alors que le cristal, lui, est bel et bien associé à cet état solide de la matière dans le tableau fourni aux élèves. Il nous semble qu'il y a ici un obstacle dans « l'inadéquation visuelle apparente » entre l'état annoncé par le document et celui (ceux) supposé(s) au sein du papier filtre (le mélange est constitué de deux phases, solide et liquide dont la dernière s'écoule lentement par les pores du papier filtre) [*« c'est comme une méduse »*] [*« on dirait de la gélatine »*][*« c'est quoi comme matière »*]

En outre, la technique de filtration a été approximativement réussie dans certains groupes ce qui aura participé à la confusion et nuit à l'émergence de l'invariant, les ions Cu^{2+} , se retrouvant *in fine* dans le papier filtre et dans le filtrat : [*« c'est passé à travers »*] [*« on l'a pas bien fait tu crois »*] [*« regarde les autres c'est blanc »*] [*« c'est parce que tu l'as jeté trop fort »*] [*« oui mais il était collé au tube »*]

Il est vraisemblable que la lecture générale, qui a amené les élèves à un retour sur l'ensemble des expériences (lors de la dernière étape : *Mon bilan*) leur aura permis de se poser de nouveau la question de la nature « du précipité bleu ». Cette re-lecture aura pu influencer leur choix et lever en partie les doutes qu'ils se posaient au moment de l'expérimentation; il est difficile d'avancer que cette identification *a posteriori* est un indice de construction de l'invariant même si on ne peut pas l'écartier pour certains d'entre eux. Une autre hypothèse consisterait à dire que par raisonnement logique ou par élimination des données présentes dans le tableau fourni, l'identification aura pu s'imposer d'elle-même. Il est probable qu'une composition de comportements, dont les deux précédents pourraient faire partie, a pu agir comme autant de facteurs d'émergence à l'identification du précipité d'hydroxyde de cuivre II ; quoi qu'il en soit, force est de constater que les bilans révèlent une juste identification du précipité à 93% (13/14) contre 50% avant le bilan.

-Par ailleurs, s'agissant de la troisième expérience, l'identification de l'oxyde de cuivre II (CuO) a été globalement bien appréhendée malgré les confusions possibles avec le solide carbone.

[*...à la fin de l'expérience, il ne reste que de la poudre noire, le peu qui reste est solide ; ce qui s'est formé c'est de l'oxyde de cuivre...*]

Nous notons que quelques rares élèves évoquent l'idée de déshydratation.

[*...c'est donc la molécule d'eau qui a disparue, le gaz qui s'est échappé était donc de l'eau qui s'est évaporée à cause de la chaleur...*]

Certains élèves interpellent l'enseignant pour savoir si « la solution bleue seule » aurait permis d'obtenir le composé chimique de couleur noire ; l'enseignant porte alors à haute température cette solution et les élèves peuvent observer que l'on ne parvient pas à former le solide noir. Il s'agit là de la première expérience « improvisée » par l'enseignant à la demande de la classe. Ce dernier n'a ni commenté ni fait commenter les observables de l'expérience laissant chacun apprécier et utiliser cette expérience comme bon lui semblait.

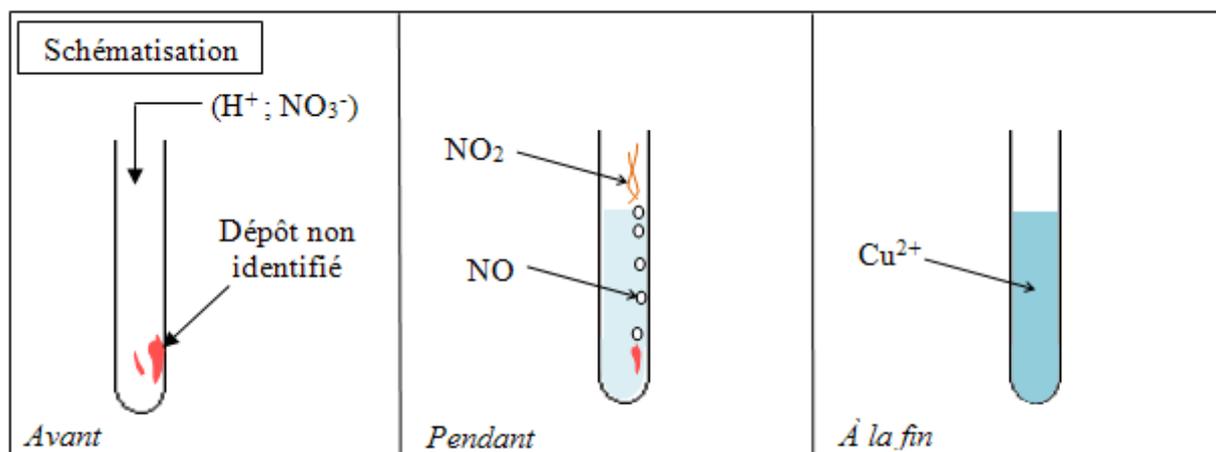
- À l'issue de la quatrième expérience (la dernière), il est à noter que 35% des élèves n'ont pas encore réussi à identifier la nature du dépôt « rougeâtre » sur les parois du tube à essais ; il règne une forte animation au sein des différents groupes et les discussions vont *bon train* sur ce point dans la majorité d'entre eux.

[*« est-ce du cuivre qui se forme ou de la rouille ? »*][*« c'est peut être des oxydes de cuivre ou des oxydes de carbone »*] [*« il s'est peut être formé le cuivre ou de la rouille.....ou quelque chose en rapport avec le cuivre »*]

Toute cette saine émulation se traduit par le désir de certains élèves (3 élèves appartenant au même groupe) de demander à ce que le professeur fasse réagir de l'acide nitrique sur le dépôt métallique de couleur orangée observable sur les parois de leur tube à essais (cette expérience complémentaire, qui serait notée N°5 dans l'organigramme, a été réalisée avant que les élèves ne rédigent leur bilan : par conséquent entre « avant le bilan » et « après le bilan »).

Exp N°5 :

L'expérience permet de montrer que le dépôt observé était bien du métal « cuivre » car les observables sont *analogues* à ceux de l'expérience N°1. Bien que *non-scientifique*, cette analyse comparative reste acceptable dans le cadre de ce protocole.



Afin de connaître la motivation de ces élèves, nous leur avons demandé dans la foulée de nous expliquer la raison de cette demande. *Ils ont imaginé que, dans l'hypothèse où il s'agirait du métal cuivre, ce dernier devrait en toute logique, comme pour la première expérience, former des ions cuivre (II) en présence d'acide nitrique.*

Tous ces élèves ont donc pu observer la formation d'une teinte bleutée à l'issue du protocole demandé, sans que le professeur ne commente ou ne fasse commenter de manière collective le résultat obtenu.

Nous avons ici une attitude très singulière de ce qui peut être assimilé à une R3.

Il est tout à fait probable que cette improvisation ait, pour certains élèves, confirmé leur première interprétation (le groupe demandeur *a minima*) et pour d'autres, influencé la tournure de leur représentation. Toutefois, seuls les élèves du *groupe demandeur* ont unanimement repris explicitement dans leur compte rendu les résultats de l'expérience pour affirmer que le dépôt correspondait bien au métal cuivre.

[...Après vérification, c'est-à-dire la réalisation de la première expérience à partir des résultats de la 4^{ème}, nous pouvons assurer sans aucune hésitation que le cuivre s'est formé...]

Ces mêmes élèves ont eu les échanges suivants :

[« tu vois c'est bien du cuivre il y a plus de doute »]... [« bon d'accord tu avais raison »]

[« donc si on rajoute de la soude, on va avoir le solide bleu de tout à l'heure »]... [« oui, bon on va pas tout refaire... »]... [« ça serait comme l'histoire sans fin ! »]

Cet échange est un témoignage de la dynamique R1-R2. L'observation (R1) permet la formulation d'une hypothèse [le dépôt est peut-être du métal cuivre] ; l'observation des symptômes observables (R1) communs à la première expérience permet de construire un lien causal (R2) et de conclure que l'hypothèse est la bonne.

À l'issue des « bilans individuels », on peut noter que la nature du métal *in fine* ne fait plus aucun doute puisque tous les élèves l'ont identifiée comme étant du métal cuivre.

Cette identification correcte est une étape importante (pour ne pas dire essentielle) vers la construction de l'invariant, même si elle n'est pas indispensable dans l'absolu ; le protocole est construit autour de cette identification qui doit susciter des interrogations sur l'idée de présence continue de cette espèce chimique au cours du protocole, mais aussi sur l'idée de conservation lors des différentes transformations.

C'est bien ici que se rejoint, à l'évidence, stratégie didactique de départ et construction cognitive d'autre part.

Si l'on résume la situation, les élèves ont réussi à construire un nombre important de représentations dans les trois catégories (R1/R2/R1-R2). Les représentations R1 sont majoritairement ciblées sur l'élément chimique cuivre. La diversité des indices favorables aux R2 ainsi que la bonne proportion de ceux relevant d'un raisonnement ou d'une tentative d'explications, voire de formulation d'hypothèse, sont des indices *a priori* favorables s'agissant de la détection de l'invariant et de la construction du concept. Ce constat est confirmé par la qualité des coordinations R1-R2 très majoritairement ciblées sur l'élément chimique cuivre qui semblent plus particulièrement se déclencher quand le métal cuivre est reformé en fin de protocole. Ces résultats témoignent de l'importance de la construction du protocole qui, par la formation du métal cuivre *in fine*, aura très fortement interrogé les élèves en les invitant à « trouver » une explication à cette observation.

Enfin, les élèves étant parvenus à identifier l'ensemble des espèces chimiques contenant l'élément chimique cuivre, nous avançons qu'ils ont de bons atouts pour construire l'invariant et par ricochet, le concept d'élément chimique. Il nous reste désormais à rechercher si ces impressions sont « réelles ».

II-2 La liaison invariant-concept

II-2-1 Vers une formulation [I_x-C_y] du lien entre l'invariant et son concept

Bien que l'analyse fine des représentations des élèves nous donnent des indications qui sortent de la subjectivité absolue et des simples implicites, et bien que notre appréciation de la construction de l'invariant passe²² par celle des représentations, nous devons construire des outils qui puissent apprécier de manière scientifique et explicite les niveaux de construction de l'invariant et du concept associé.

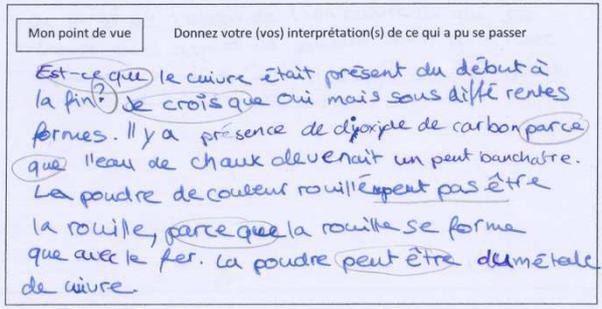
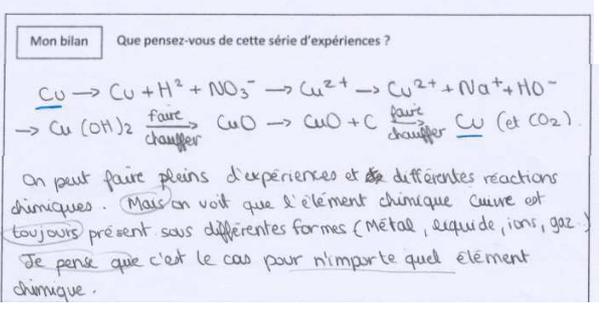
S'agissant du niveau (I_x) de construction de l'invariant, une proposition est élaborée afin d'identifier le cheminement cognitif de l'élève. Cette proposition s'articule autour de cinq niveaux de construction.

- Les trois premiers témoignent de la non-identification de l'invariant qui, ou bien n'est pas approché (I₀), ou bien n'est qu'approché de manière implicite avec plus ou moins de précision et d'indices favorables à son émergence (de I₁ à I₂).
- Les deux derniers traduisent l'identification de l'invariant de manière explicite. Si pour (I₃) l'invariant est désormais identifié, pour (I₄) l'élève parvient à généraliser l'invariant à l'ensemble des éléments chimiques.

Nous donnons (cf pages suivantes) pour chaque niveau de construction de l'invariant, les critères retenus (commentaires), et un extrait du corpus qui l'illustre (exemples de représentations).

²² Construire l'invariant, construire le concept, peut-il se faire sans « représenter » ?

Niveau (I _x) de construction de l'invariant		Commentaires	Exemples de représentations
INVARIANT NON IDENTIFIÉ	Invariant absent (I ₀)	<p>Il n'y a pas de lien entre les différentes transformations bien que l'élément soit identifié sous différentes formes.</p> <p>La « réapparition » finale du cuivre métal va à l'encontre de la continuité de la présence de l'élément.</p>	<p>Mon bilan Que pensez-vous de cette série d'expériences ?</p> <p>Nous avons fait dissoudre le cuivre, nous avons pu distinguer plusieurs états du cuivre (liquide, solide, poudre), et ensuite après l'avoir mis en poudre, il est devenu solide.</p> <p>Nous avons remarqué que le cuivre passe du solide au liquide et inversement.</p> <p>Je pense que l'acide nitrique a pris des électrons au fer.</p> <p>Le cuivre a pu les reprendre en passant par plusieurs oxydations.</p> <p>Le liquide incolore sorti du filtre et l'acide nitrique (car) l'hydroxyde de cuivre s'est séparé de l'acide mis auparavant grâce au filtre.</p> <p>Donc on peut le mélanger et le redémélanger.</p> <p>- Ce qui réapparaît à la fin et redonne du cuivre ou de l'oxyde de cuivre.</p>
	Invariant sous-jacent (I ₁)	<p>Les expériences sont liées les unes aux autres sans que le lien soit pour autant identifié.</p> <p>Quelques parties de la représentation (forme et couleur) peuvent laisser penser qu'une continuité est toutefois sous-jacente.</p>	<p>Mon bilan Que pensez-vous de cette série d'expériences ?</p> <p>Je pense que cette série d'expériences sont liées les unes aux autres (car) elles résultent l'expérience de départ c'est à dire la présence du métal de cuivre à la fin de quatrième expérience.</p> <p>expérience 1: dissolution de cuivre</p> <p>expérience 2: obtention de l'ion II</p> <p>expérience 3: après avoir chauffé l'hydroxyde de cuivre, on obtient de la poudre de cuivre.</p> <p>expérience 4: obtention de l'oxyde de cuivre à partir du mélange entre l'ion Cu^{II} et la concentration de sulfate.</p> <p>après avoir chauffé l'hydroxyde de cuivre, on obtient de la poudre de cuivre.</p> <p>mélange d'oxyde de cuivre et de carbone.</p> <p>chauffage</p>
	Invariant approché (I ₂)	<p>Les expériences sont liées les unes aux autres (ici, positions des accolades, « fléchage retour », codification des différentes espèces chimiques). La notion de « boucle » est parfois évoquée. Le mot « cuivre » apparaît aux quatre différentes étapes expérimentales. Toutefois la présence de l'invariant reste implicite.</p>	<p>Mon bilan Que pensez-vous de cette série d'expériences ?</p> <p>Je pense que ces séries d'expériences sont liées les unes aux autres (car) on peut retrouver le résultat de départ c'est à dire la présence du métal de cuivre à la fin de la quatrième expérience.</p> <p>expérience 1: mélange acide nitrique</p> <p>expérience 2: addition de l'ion Cu^{II}</p> <p>expérience 3: obtention de l'hydroxyde de cuivre puis addition d'oxyde de cuivre.</p> <p>expérience 4: obtention du mélange d'oxyde de cuivre et de carbone puis chauffage et obtention de métal de cuivre.</p> <p>RETOUR A LA 1^{re} EXPERIENCE</p>

Niveau (I _x) de construction de l'invariant		Commentaires	Exemples de représentations
INVARIANT IDENTIFIÉ	Invariant identifié (I ₃)	La présence de l'invariant est identifiée à chaque étape du protocole. Le mot cuivre est ici utilisé dans sa fonction d'élément ce qui témoigne de l'amorce d'une différenciation entre substances chimiques et « élément ».	
	Invariant identifié et généralisé (I ₄)	L'invariant est identifié, sa présence est continue tout au long du protocole (ici, chaque transformation est écrite sous forme symbolique avec des écritures scientifiques). L'invariant est associé au concept d'élément. L'invariance est également généralisée à l'ensemble des éléments.	

Enfin, comme pour l'invariant, une proposition d'identification des niveaux (C_y) de construction du concept de l'élément chimique est établie à l'issue du protocole expérimental.

À ce stade nous organiserons cette proposition en la déclinant en trois niveaux,

- C₀ (non acquis)
- C₁ (en cours d'acquisition)
- C₂ (vraisemblablement acquis)

tout en la connectant génétiquement à celle de l'invariant. Ainsi, les connexions nous semblent s'établir naturellement de la manière suivante [I₀ - C₀], [I₁ - C₁], [I₂ - C₁], [I₃ - C₂] et enfin [I₄ - C₂]. Ces

connexions doivent nous permettre d'apprécier dans le contexte situé de cette recherche la force du lien entre l'invariant et le concept.

Nous proposons donc de croiser les deux outils qui identifient les niveaux de construction de l'invariant et du concept [$I_x - C_y$] pour chaque élève et de collationner les résultats du groupe.

Les différents niveaux de construction de l'invariant (I_x), d'une part, et du concept (C_y), d'autre part, s'apprécient à partir de l'analyse de l'ensemble du corpus de chaque élève y compris sa proposition de titre. Pourquoi demander aux élèves d'inventer un titre à cette série d'expériences en fin de protocole ? Il est souvent recommandé par les corps d'inspection d'organiser avant le départ des élèves un temps consacré à « *ce que l'on a appris aujourd'hui* ». Celui-ci permet de revenir à l'essentiel et de résumer les grandes lignes de la nouvelle notion. Il permet aussi à l'enseignant de faire le point sur le niveau d'acquisition d'une compétence sous une forme d'évaluation diagnostique en situation. Les enseignants sont parfois surpris du décalage qui peut exister entre une impression générale favorable au regard du déroulement de la séance et « *ce qui a été réellement perçu par le groupe* ».

L'écriture d'un titre permet de pouvoir récupérer d'autres informations qui participeront à l'appréciation générale du niveau d'acquisition du concept grâce à une obligation de réflexion supplémentaire qui favorisa une éventuelle évolution des différents niveaux d'acquisition.

Certains titres proposés ne semblent pas poser de réel problème d'interprétation :

[...*la conservation des éléments chimiques.*] celui-ci relève clairement de la filiation [$I_4 - C_2$].

Il en est de même pour les deux titres suivants [...*la conservation de l'élément cuivre.*] ou bien [...*Présence et conservation d'un élément chimique à travers différentes réactions chimiques.*] qui relèvent eux de la filiation [$I_3 - C_2$].

Les titres permettent aussi de confirmer un niveau d'acquisition $I_0 - C_0$ comme pour le suivant : [...*Plusieurs états du cuivre de sa disparition à sa réapparition.*] où la première partie permet d'observer la difficulté à utiliser le mot « état » et la seconde met en évidence la discontinuité de la présence de l'élément.

La majorité des titres se situent sur des filiations intermédiaires : [*Le cuivre sous différentes formes*] – [*La boucle des réactions chimiques entre les éléments*] – [*Du cuivre au cuivre...*].

Un titre correspond à la reprise d'une phrase « célèbre » : [*Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme*] ; cet élève est venu spontanément nous voir pour s'excuser d'utiliser cette reprise en ajoutant [*« je ne vois pas ce que je pourrai écrire de mieux que ça »*].

Trois titres ($T1, T2, T3$) nous ont plus particulièrement interrogés :

$T1$ [*Du cuivre au cuivre...*] – $T2$ [*Du cuivre, au cuivre....*] – $T3$ [*Du cuivre....au cuivre !*].

Ces trois élèves sont parvenus à la même filiation avant la rédaction de leur titre à savoir la filiation [$I_2 - C_1$].

Nous avons donc procédé à une interview des trois élèves pour qu'ils expliquent « ce qu'ils avaient voulu dire plus précisément » : si les deux premiers qui avaient inventé les titres ($T1$) et ($T3$) s'étaient focalisés sur la « *reformation* » du métal cuivre, le troisième ($T2$) avait voulu expliquer (par la présence de la virgule et des pointillés), que « le cuivre » (l'élément cuivre) était présent de manière permanente.

Voici un extrait de cet entretien : P (enseignant) et E (élève)

P1/ Dans ton titre, tu as utilisé une virgule et des pointillés ; peux-tu me dire à quoi servent ces signes, s'ils sont importants ou pas... ?

E1/ les pointillés c'est parce que ça fait une boucle, on revient au début...

P2/ c'est-à-dire...

E2/ et bien on avait du cuivre au départ et on en a encore à la fin

P3/ d'accord ; et la virgule ?

E3/ en fait c'était pour dire qu'il était là tout le temps

P4/ tu viens de me dire qu'il était là au début et à la fin !

E4/ non mais en fait je voulais dire le solide

P5/ tu veux dire le métal ?

E5/ oui c'est ça

P6/ d'accord ; alors je te propose d'appeler la forme solide du cuivre « métal cuivre ». Est-ce que pour toi le « métal cuivre » était présent tout au long de l'expérience ?

E6/ non ; mais c'est pour ça la virgule parce que c'est pas possible qu'il disparaisse complètement. D'ailleurs on avait CuO et puis Cu²⁺ et puis la pâte bleue je sais plus son nom mais il est dedans aussi...

P7/ mais c'est qui ce « il » ?

E7/ et beh je sais pas

P8/ Je te propose de l'appeler « l'élément » ?

E8/ le cuivre !

P9/ tu es sûr que l'on peut l'appeler « le cuivre » ?

E9/ nonc'est alors « l'élément du cuivre » !

P10/ d'accord ça me va ; alors cette virgule elle était importante pour toi ?

E10/ oui, ça veut dire qu'« il » heu...que « l'élément de cuivre » est toujours là à chaque fois en fait

P11/ je te remercie pour toutes ces précisions

E11/ donc en fait c'était pas faux mon titre, enfin.....c'était pas tout à fait juste !

P12/ Oui, mais tes précisions me disent que tu avais compris quelque chose d'essentiel.

À l'issue de cette conversation, la filiation de cet élève est passée de [I₂-C₁] à [I₃-C₂]

	C ₀ « non acquis »	C ₁ « en cours d'acquisition »	C ₂ « vraisemblablement acquis »
Invariant absent (I ₀)	1		
Invariant sous-jacent (I ₁)		1	
Invariant approché (I ₂)		5 = 7(-2)	
Invariant identifié (I ₃)		Effet.....titre →	3 = 1(+2)
Invariant identifié et généralisé (I ₄)			4
TOTAL 1	1	6	7
TOTAL 2	7	43	50

Bilan des liaisons [Invariant- Concept] pour le groupe.

Le premier total (**TOTAL 1**) informe sur l'effectif ayant atteint un niveau de construction du concept donné, quand le second (**TOTAL 2**) donne l'information en pourcentage du groupe. La moitié (50%) des élèves ont *vraisemblablement acquis* à l'issue de la séance le concept de l'élément chimique

(7/14). Tous ces élèves ont su construire et stabiliser l'invariant (niveau minimal I_3 atteint) pour parvenir à ce niveau d'acquisition du concept. Parmi les élèves n'ayant pas identifié l'invariant (7 élèves) une majorité (5/7) est toutefois parvenue à l'approcher. Seuls deux élèves restent sur une liaison $[I_0 - C_0]$ pour l'un et $[I_1 - C_1]$ pour l'autre.

Nous observons que pour construire le concept il semblerait devoir « tenir » l'invariant.

Enfin, s'il existe un *effet titre* pour deux élèves, symbolisé dans le tableau par le code (+2), passant ainsi de $[I_2 - C_1]$ à $[I_3 - C_2]$, nous constatons que la majorité des élèves conserve la liaison acquise à l'issue du bilan.

La lecture de ce tableau nous donne le sentiment qu'il existerait une liaison « intime » entre invariant et concept pour l'élément chimique, qui pourrait se résumer par la formule lapidaire suivante : « pas d'invariant, pas de concept » et réciproquement !

II-2-2 Vers l'idée de filiations cognitives²³

Nous venons de croiser deux outils (les niveaux de construction de l'invariant et du concept) afin d'établir pour chaque élève sa « liaison » $[I_x - C_y]$.

Il nous est apparu naturel de tenter de mettre en regard les représentations des élèves avec leur propre liaison afin de pouvoir observer si la manière de représenter pouvait impacter « la qualité » de celle-ci.

Nous proposons d'appeler *filiation cognitive* en cours de formation d'un sujet, la mise en relation entre sa liaison invariant-concept atteinte et ses représentations R1/R2/R1-R2 construites.

Ces filiations récapitulent l'ensemble des données recueillies et interprétées à partir des corpus individuels. Elles prennent la forme suivante :

$$[I_x - C_y] / R1[a/b] / R2[c/d] / R1-R2[e/f]$$

Ce cheminement cognitif est un outil qui pourrait nous donner des renseignements sur l'individu et sur le scénario didactique mis en place. Il ne s'agit pas de se montrer trop naïf et de croire que nous construisons ici des « cartes d'identité », mais plutôt des profils susceptibles de nous inviter à émettre des hypothèses à éprouver sur d'autres contextes.

Si l'on part de l'hypothèse que faire construire ou susciter la construction des représentations chez les élèves est potentiellement favorable à l'émergence de l'invariant (et favorable par ricochet pour le concept), cela pourrait peut-être s'observer à partir de l'analyse de ces *filiations cognitives*.

Nous avons collationné dans un même tableau²⁴ ces filiations cognitives. Nous les avons ordonnées par l'entrée liaison *invariant-concept* définissant ainsi cinq groupes d'élèves.

L'élève \mathcal{F} appartient au groupe $[I_3 - C_2]$ et sa filiation cognitive est :

$$[I_3 - C_2] / R1[8/4] / R2[14/19] / R1-R2[17/1]$$

Nous avons par ailleurs déterminé la valeur moyenne du groupe s'agissant des répartitions des représentations ce qui nous donne le résultat suivant :

$$R1[7/3] / R2[11,7/14] / R1-R2[11/1,7]$$

Si l'on compare la filiation moyenne du groupe avec celle de l'élève \mathcal{F} , on observe qu'il a produit des représentations au plus près de l'invariant (colonnes vertes du tableau – notées en gras ci-dessus) en plus grand nombre et ce sur toutes les catégories.

²³ Cf. *supra* Chap V (II-1-5 I)

²⁴ Cf. *tableau page suivante*

Liaisons [I _x -C _y] « 24rural »	R1			Indices R2			R1-R2			ÉLÈVE
	a	b	Total	c	d	Total	e	f	Total	
[I ₄ - C ₂]	9	8	17	15	25	40	12	3	15	A
	7	12	19	12	30	42	20	2	22	B
	6	7	11	17	41	58	16	1	17	C
	10	7	17	18	20	36	16	4	20	D
	8	8,5	16	15,5	29	44	16	2,5	18,5	
[I ₃ - C ₂]	6	2	8	6	9	15	8	2	10	E
	8	4	12	14	19	33	17	1	18	F
	7	3	10	15	14	29	8	2	10	G
	7	3	10	11,7	14	25,7	11	1,7	12,7	
[I ₂ - C ₁]	7	5	12	7	13	20	10	3	13	H
	5	2	7	10	11	21	8	2	10	I
	6	5	11	11	11	22	7	3	10	J
	5	3	8	16	19	35	9	3	12	K
	6	4	10	15	30	45	11	1	12	L
	5,8	3,8	9,6	11,8	16,8	28,6	9	2,4	11,4	
[I ₁ - C ₁]	3	2	5	13	17	30	8	2	10	M
[I ₀ - C ₀]	8	6	14	9	32	41	16	1	17	N
TOTAL	93	70	163	178	292	470	166	30	196	
Moyenne/élève	6,6	5	11,6	12,7	20,8	33,5	11,9	2,1	14	

Bilan des filiations cognitives pour le groupe

Le tableau ci-dessus récapitule donc pour chaque élève l'ensemble des représentations qu'il a produit lors du protocole expérimental et met en relation chaque filiation R1/R2/R1-R2 avec la liaison [I_x - C_y] correspondante.

Cinq groupes d'élèves sont alors repérés / **Groupe 1** (élèves de **A** à **D**), **Groupe 2** (élèves de **E** à **G**), **Groupe 3** (élèves de **H** à **L**), **Groupe 4** (élève **M**), **Groupe 5** (élève **N**).

Sont notés pour la classe, en avant dernière ligne, les totaux de chaque type de représentations et en dernière ligne, la moyenne par type de représentations. Sont notées en surlignage « jaune » les moyennes par sous-groupes de chaque type de représentations.

Ainsi, cinquième colonne et septième ligne, le nombre **15,5** signifie que le **Groupe 1** (élèves de **A** à **D**) a produit 15,5 représentations en moyenne de type R2(c).

Enfin, *avant dernière colonne et avant dernière ligne*, le nombre 196 signifie que la classe a construit 196 coordinations R1-R2, et que, *dernière ligne*, le nombre 14 correspond au nombre moyen de coordinations R1-R2 par élève.

Nous souhaitons mettre en perspective les résultats des deux élèves **M**, et **N** avec leur corpus respectif. Ces deux élèves sont les deux seuls du groupe-classe n'ayant pas identifié tous les composés chimiques contenant l'élément cuivre.

Pour l'élève **M**, l'espèce non-identifiée est l'hydroxyde de cuivre ; cet élève « sent » que ces expériences sont liées entre elles [*Je pense que ces expériences sont liées les unes aux autres...*] sans pour autant parvenir à pointer du doigt l'invariant, mais ce n'est pas faute d'avoir « cherché » : en témoigne le nombre d'indices R2 produits et de coordinations également.

Pour l'élève **N**, l'espèce non-identifiée est le métal cuivre produit en fin d'expérience 4. L'élève est perturbé par la couleur qu'il associe (inconscient social) à de la rouille ce qui l'amène sur une « fausse-piste ». Son compte rendu est le témoignage d'une réflexion qui joue sur les contradictions et sur le doute :

- Mes observations (Exp4) [*Le cuivre s'est reformé sur les parois du bécher*]

- Mon point de vue (Exp4) [*Est-ce du cuivre qui se forme ou de la rouille ?.....C'est peut-être des oxydes de cuivre ou des oxydes de carbone*]

- Mon bilan [*Ce qui réapparaît à la fin est redevenu du cuivre ou de l'oxyde de cuivre*]

Bien que la liaison atteinte soit « décevante », l'agitation cognitive bat son plein et nous renforce dans l'idée d'offrir des espaces où les sujets puissent *représenter*.

Dans les deux cas précédents, la non-identification semble se poser comme un obstacle à l'émergence de l'invariant et par ricochet à la lecture du concept.

Nous nous focalisons maintenant sur le **Groupe 1** (élèves de **A** à **D**), celui qui est parvenu à atteindre la liaison [**I₄ - C₂**].

Ces élèves ont produit une quantité de représentations supérieure à la moyenne du groupe-classe (+**38%** pour les R1 et +**21%** pour les R1(a) ; +**24%** pour les indices R2 et +**22%** pour les indices spécifiques R2(c) ; +**32%** pour les coordinations R1-R2 et +**34%** pour les coordinations R1-R2(e)).

Nous émettons l'hypothèse selon laquelle il est probable que la manière de représenter puisse impacter la qualité de la liaison Invariant-Concept atteinte sans identifier une catégorie plus particulièrement qui se poserait comme « incontournable ».

Nous tentons désormais de mettre en perspective les **Groupes 2 et 3** (élèves de **E** à **G**), et (élèves de **H** à **L**) qui sont parvenus à atteindre respectivement les liaisons [**I₃ - C₂**] et [**I₂ - C₁**]. Les deux groupes se situent sous la moyenne des représentations, toutes catégories confondues, et ont produit des indices R2(c) en nombre comparable (11,7 contre 11,8). Toutefois le groupe 2 a produit plus de représentations que le groupe 3 au plus près de l'invariant + **20%** de R1(a) et +**18%** de R1-R2(e). Ce différentiel pourrait, en partie, expliquer le saut de liaison observé, qui fait passer le sujet de I₂ à I₃ de C₁ à C₂.

Il est bien évident que sur un plan purement didactique l'appréhension du « pourquoi » de ce saut qualitatif s'afficherait comme une réelle priorité.

Épilogue du chapitre

Ces résultats semblent légitimer le bien fondé du scénario, qui, d'une part, favorise la lecture de l'invariant et, d'autre part, met l'élève en situation de produire individuellement des représentations par constellation.

Et si la structure de Vergnaud était également « transférable » en sciences physiques ?

Si l'invariant est *opérateur* pour Vergnaud (une opération est une action et sa réversibilité) ici, force est de constater que le côté réversible est absent. C'est un premier différentiel qui demanderait à être précisé.

Ces premiers résultats nous laissent sur notre faim. Certes, ils nous « intéressent » et pourraient nous satisfaire. Notre éthique, d'une part, notre curiosité et notre soif d'aller plus loin, d'autre part, prennent largement le dessus sur tout satisfecit et dérive jubilatoire malvenue. « Dites- moi ce que vous cherchez et je vous dirai comment le trouver »²⁵ ; si l'on veut trouver le nombre d'or dans une tapisserie d'Aubusson, il suffit de prendre son temps.

Ce n'est pas parce que les résultats de ce premier travail vont dans le sens de notre hypothèse que les « jeux sont faits » ; bien au contraire, tout commence et ce sont dans les recherches de contre-vérités que le jeu devient intéressant.

Pour toutes ces raisons apparentes, et pour bien d'autres, nous allons dans le chapitre suivant, présenter d'autres analyses, d'autres outils, d'autres résultats et en définitive d'autres perspectives, qui vont réussir à remettre en question ces premières tendances et nous ouvrir, par ailleurs, d'autres horizons.

²⁵ « L'intérêt d'une thèse est-elle dépendante de sa capacité à trouver ce que l'on cherche ? »

Chapitre VII L'élément chimique : seconde lecture

Synthèse de ce chapitre

À ce stade de notre recherche, les deux grandes tendances de la première lecture, avancées dans le chapitre précédent, se confirment tout en s'infléchissant.

- Il existe un lien « intime » entre Invariant et Concept. Pour construire le concept, il semble bien falloir construire l'invariant – en revanche bien construire l'invariant ne garantit pas « à tous les coups » de construire le concept. La mise en scène qui consisterait à faire émerger le premier chez un sujet, impacterait positivement la construction du second, sans qu'il existe de relation d'exclusivité pour autant.

- La structure (S, I, S) proposée par Vergnaud semble tout à fait adaptée à l'apprentissage du concept d'élément chimique en seconde générale.

I- Intérêts et limites des résultats de la première lecture

L'épisode de l'interview¹ nous a montré, s'il en était besoin, que la représentation n'est pas un objet « docile » et qu'elle est bel et bien une inférence. Tirer des plans sur la comète à partir du seul corpus présenté au précédent chapitre serait une sorte de provocation intellectuelle. Sans aller jusqu'à vouloir porter notre hypothèse de départ plus avant pour aller chercher « la contradiction », et obtenir si ce n'est l'opposé, pour le moins des indices susceptibles de contrarier sérieusement ce que l'on vient de « dire », nous souhaitons, pour le moins, éprouver ces premiers résultats sur d'autres contextes. Par ailleurs, nous critiquerons ici notre outil qui amène aux liaisons invariants-concepts constatées. En effet, si la catégorisation de l'invariant semble acceptable, nous allons toutefois l'affiner. S'agissant de celle du concept, elle reste trop tautologique² et doit impérativement se confronter à des critères plus rigoureux afin de laisser *la chance* à d'autres formes [I_x-C_y] d'émerger.

En outre, si l'idée de corrélérer ces liaisons aux représentations ne répond pas explicitement à notre hypothèse de départ, nous pensons qu'elle peut apporter des perspectives ou des remédiations sur le plan didactique dans la conquête des concepts scientifiques.

II- Nouveaux contextes environnementaux

II-1 Les descriptifs

Nous avons choisi deux contextes très différents pour mettre à l'épreuve nos premiers résultats. Le premier est situé dans une cité scolaire de centre-ville à Périgueux (préfecture de la Dordogne (24)) au lycée Bertran de Born ; le second est situé dans un département d'outremer en Martinique (972) au lycée Bellevue à Fort de France.

Périgueux est une ville divisée en trois cantons qui renferme environ 30 000 habitants. Elle est traversée par une rivière « l'Isle » et contournée au Sud par l'autoroute A89 qui relie Bordeaux à Lyon. Gare et aéroport à proximité désenclavent cette ville née en 1240.

Fort de France, port des Petites Antilles d'environ 90 000 habitants est le chef-lieu du département et de la région Martinique. La ville fait partie d'une conurbation de 170 000 personnes et possède un aéroport international. Ces deux établissements proposent tous les deux des poursuites d'études post-bacs en classes préparatoires.

À Périgueux, les élèves ont le choix entre les sections CPGE³ « Lettres » et « Sciences » ou un BTS « Services informatiques aux organisations ».

À Fort de France, les élèves ont en plus le choix CPGE « Economique et commerciale » et cinq choix de BTS adaptés au contexte économique local – le lycée propose également un parcours DTS « Imagerie médicale ».

Contrairement aux élèves de seconde de Ribérac (premier corpus), ceux des deux lycées ont des déplacements plus courts pour se rendre dans leur établissement respectif et bénéficient d'un réseau de transport urbain.

Année	Taux de réussite	Rang départemental	Rang national	Variation
2011	88%	10/40	1960/5627	+0.69%
2010	87%	16/40	2332/5627	-1.69%
2009	89%	/40	2111/5627	+1%
2008	88%	/40	1672/5627	-1%
2007	89%	/40	1464/5627	-

Ci-dessus les résultats⁴ au baccalauréat du lycée Bellevue toutes sections confondues pour les cinq dernières années.

¹ Cf. *infra*. Chap VI (II-2-1)

² Il y a comme un goût de truisme qui émerge après coup tant notre décision est prégnante dans la catégorisation du concept.

³ Les classes préparatoires aux grandes écoles.

⁴ D'après le site http://www.linternaute.com/ville/ville/lycee/23292/detail/lycee_bellevue.shtml (consulté le 24/04/2012)

Année	Taux de réussite	Rang départemental	Rang national	Variation
2011	82%	17/31	2981/5627	-4.63%
2010	87%	16/31	2454/5627	+0.63%
2009	86%	20/31	2712/5627	+2%
2008	84%	15/31	2323/5627	-3%
2007	87%	17/31	1839/5627	+3%
2006	84%	14/31	2088/5627	+2%
2005	82%	8/31	1341/5627	-2%
2004	84%	5/31	1130/5627	-3%
2003	87%	4/31	848/5627	-

Ci-dessus les résultats⁵ au baccalauréat du lycée Bertran de Born toutes sections confondues pour les neuf dernières années.

Les deux collègues qui se sont portés « volontaires-désignés »⁶ sont tous les deux *au fait* de la démarche par investigation. L'un travaillait sur le sujet, en ma compagnie bien avant que cette méthodologie ne vienne s'inviter au lycée, ce qui nous a permis d'échanger sur l'objet avec l'inspection régionale dans l'académie de Bordeaux, quand l'autre est à statut partagé⁷ avec l'IUFM de Martinique.

Si les contacts avec le collègue métropolitain ont été très faciles, ceux avec notre collègue Antillais ont été électroniques s'agissant de la préparation⁸. Dans la mesure où tous les deux, comme lors de la première tentative, avaient « l'habitude » de cet enchaînement expérimental⁹, la phase de préparation s'est avérée assez simple. Bien entendu, les deux nouvelles classes ont réalisé ce même protocole, dans les mêmes conditions qu'à Ribérac (étude du chapitre précédent) : même matériel à disposition, mêmes formes de supports¹⁰, mêmes consignes, même forme organisationnelle (une heure trente en binôme). Ce sont quatorze élèves en Martinique et seize à Périgueux qui sont passés au crible de cette expérience lors du premier trimestre de l'année scolaire 2011-2012, découvrant ainsi ce protocole.

II-2 Les deux nouveaux corpus

Nous codons le corpus récupéré en Martinique par « 972 », celui de Périgueux « 24 urbain » en référence à celui de Ribérac que nous codons « 24 rural ». L'observation rapide des deux nouveaux corpus fait apparaître un bon investissement général des supports bien qu'ils présentent des « blancs » sur quelques parties. Si un seul espace¹¹ sur le corpus « 24 rural » était resté vierge de représentations (élève I), ce sont neuf espaces concernant cinq élèves (B,C,D,G et I) pour Fort de France et treize pour neuf élèves (A,B,C,D,F,J,L,M et O) à Périgueux. Seuls trois élèves, tous à Périgueux, n'ont pas investi leur feuille « Mon Bilan ».

Comme pour le corpus « 24 rural », les deux nouveaux proposent des représentations qui dénotent de l'hétérogénéité dans l'application à rendre compte des observations. Ci-dessous (*Doc A*) l'élève décrit (« fumée » - « ébullition » - « acide bleu ») avec précision (couleur-aspects) sans pour autant, à ce stade, identifier les espèces chimiques mises en jeu.

⁵ D'après le site http://www.linternaute.com/ville/ville/lycee/26470/detail/lycee_bertran_de_born.shtml (consulté le 24/04/2012)

⁶ Il s'agit de collègues-amis !! M.Grasset (24) et Tinas (972) ; tous les deux sont agrégés.

⁷ Ce collègue effectue la moitié de son service en IUFM ;

⁸ Nous avons pu échanger de vive voix lors du colloque international du CRREF (Pointe à Pitre, octobre 2011)

⁹ Cf. *supra*. Chap VI (I-2-2)

¹⁰ Une légère adaptation a été réalisée dans la présentation des expériences découpées en trois temps (avant-pendant-à la fin l'expérience)

¹¹ Un espace est une des trois zones : « Schématisation » - « Mes observations » - « Mon point de vue »

Expérience N°1 A

Schématisation

Avant: tube à essai, tournure de cuivre

Pendant: mélange bleu/vert, ébullition cuivre, fumée orangée

À la fin: acide bleu

Expérience N°4 B

Schématisation

chauffage: charbon

eau de chaux: cuivre

chauffage

Ci-dessus (*Doc B*), l'élève parvient à identifier la formation du métal cuivre (« cuivre ») et le codifie en utilisant une couleur cohérente, mais n'identifie pas encore la formation du dioxyde de carbone bien qu'il utilise une codification (des tirets bleus) pour représenter l'apparition du précipité qui trouble l'eau de chaux.

S'agissant des représentations R1 – nous remarquons que le corpus « 972 » présente une singularité. En effet, les élèves ont en moyenne utilisé 20 occurrences colorées par élève contre 12 pour les élèves « 24 rural » et 8 pour les élèves « 24 urbain ». On peut s'interroger sur le bienfondé possible d'un effet de *contexte* pouvant expliquer ce constat.

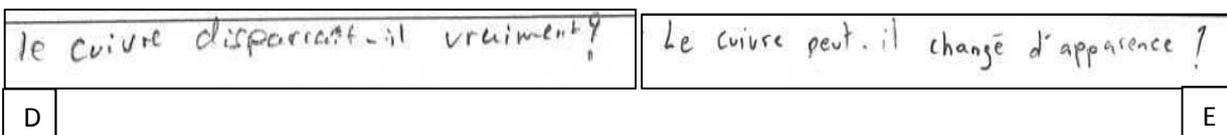
Mon bilan C

Que pensez-vous de cette série d'expériences ?

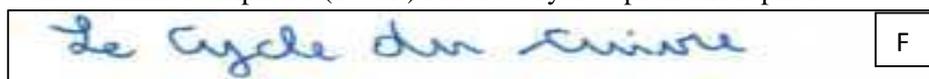
```

    graph TD
      Oxide["oxyde de cuivre"] -- "+ carbone chauffage." --> Metal["métal cuivre"]
      Metal -- "+ Acide nitrique" --> Ion["ion cuivre II"]
      Ion -- "+ hydroxyde de sodium" --> Hydroxide["Hydroxyde de cuivre"]
      Hydroxide -- "chauffage" --> Oxide
  
```

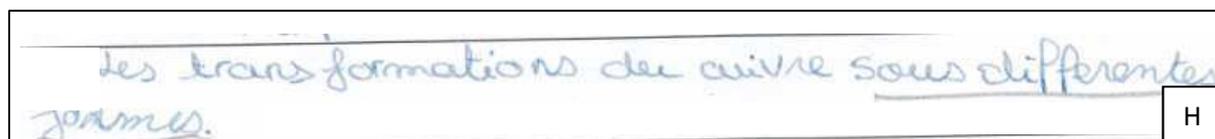
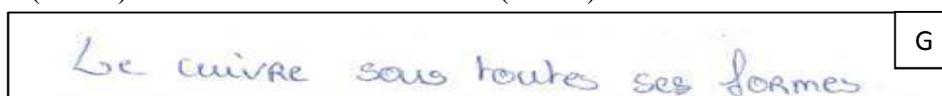
S'agissant des feuilles « Mon bilan » (*Doc C page précédente*), nous observons une nouvelle manière de schématiser les expériences sous forme d'un cycle. Ici les flèches peuvent tout autant symboliser la transformation chimique (les termes qui leur sont associés suscitent cette idée), comme l'idée de continuité *via* la forme circulaire de l'ensemble. S'agissant des titres, certains d'entre eux sont écrits sous forme interrogative (*Docs D et E*) ce qui est une innovation. Ils témoignent d'une réflexion très intéressante oscillant entre problématique, hypothèse, laquelle reste en suspens.



Nous retrouvons de manière explicite (*Doc F*) l'idée de cycle à plusieurs reprises.



Nous retrouvons par ailleurs deux idées déjà exprimées¹² mais ici proposées différemment : l'idée de « formes » (*Doc G*) et l'idée de « transformation » (*Doc H*).



Enfin, nous remarquons que le mot « conservation » est absent de tous les comptes rendus.

Si ces deux corpus nous semblent en première approche moins riches (nombres de représentations) que le premier, nous sommes bien conscients que cette appréciation très subjective demande à être confrontée à des outils qui permettront une analyse plus fine afin d'éprouver notre seule intuition.

Nous allons maintenant présenter les nouvelles catégorisations (I_x) et (C_y) retenues pour déterminer les niveaux de construction de l'invariant et du concept.

III- Les nouveaux outils d'analyse

III-1 Nouveaux niveaux de construction de l'invariant

Lors de l'analyse du premier corpus « 24 rural », nous proposons une catégorisation de l'invariant en cinq niveaux de construction de I_0 à I_4 .

Niveaux de construction de l'invariant utilisé pour le corpus « 24 rural »	
I_0	Il n'y a pas de lien entre les différentes transformations bien que l'élément soit identifié sous différentes formes. La « réapparition » finale du cuivre métal va à l'encontre de la continuité de la présence de l'élément.
I_1	Les expériences sont liées les unes aux autres sans que le lien soit pour autant identifié. Quelques parties de la représentation (forme et couleur) laissent penser qu'une continuité est toutefois sous-jacente.
I_2	Les expériences sont liées les unes aux autres. La notion de « boucle » est parfois évoquée. Le mot « cuivre » apparaît aux quatre différentes étapes expérimentales. Toutefois la présence de l'invariant reste implicite.
I_3	La présence de l'invariant est identifiée à chaque étape du protocole. Le mot cuivre est ici utilisé dans sa fonction d'élément ce qui témoigne de l'amorce d'une différenciation entre substances chimiques et « élément ».
I_4	L'invariant est identifié, sa présence est continue tout au long du protocole (chaque transformation est écrite sous forme symbolique avec des écritures scientifiques). L'invariant est associé au concept d'élément. L'invariance est également généralisée à l'ensemble des éléments.

Première proposition de catégorisation de l'invariant

¹² Cf. *supra*. Chap VI (II-1-1) les documents L et N

Cette catégorisation nous a semblé trop *inspirée* du corpus lui-même et/ou pour le moins insuffisamment tournée vers un référent théorique solide.

Nous avons décidé de revenir à ce qui relève des attributs de l'invariant en dehors de toute considération didactique. Ce qui caractérise l'invariant associé au concept de l'élément chimique est « *l'idée de continuité de présence* ». L'opération cognitive de l'élève s'inscrit dans une capacité à observer, dans la collection des espèces chimiques, l'attribut commun : *l'invariant* (en cela il est « opératoire »). L'observer, l'identifier revient à prendre la mesure de sa présence. Prendre conscience de sa redondance sémantique (métal *cuivre* – ions *cuivres* II – hydroxyde de *cuivre* II – oxyde de *cuivre* II), voire symbolique (**Cu**, **Cu²⁺**, **Cu(OH)₂**, **CuO**) revient à faire émerger la continuité au cours du protocole. Ainsi, plutôt que de s'appuyer sur ce qu'il (l'invariant) n'est pas, ou sur ce que nous disent les sujets, nous voulons nous concentrer sur ce qu'il est et mettre ainsi en avant ses propres attributs. C'est une différence d'approche fondamentale qui permet de décontextualiser et de s'affranchir des zones subjectives de la première catégorisation.

La catégorisation est construite à partir de « dénominateurs communs » qui peuvent être réinvestis quels que soient les contextes choisis (en seconde générale).

Nouveaux niveaux de construction de l'invariant utilisés dans l'analyse croisée des trois corpus	
I ₁	La continuité de la présence de « l'espèce cuivre » est <u>absente</u> .
I ₂	La continuité de la présence de « l'espèce cuivre » est <u>abordée</u> . <i>Ex Idée de retrouvailles, de reconstitution – Description avec les espèces chimiques</i>
I ₃	La continuité de la présence de « l'espèce cuivre » est <u>implicite</u> . <i>Ex Non disparition - Traces permanentes - Représentations coordonnant les espèces chimiques entre elles</i>
I ₄	La continuité de la présence de « l'espèce cuivre » est <u>explicitée</u> .

Nouvelle catégorisation retenue pour l'invariant

La catégorisation est simplifiée passant de cinq niveaux à quatre niveaux. Toutes les anciennes considérations qui relèvent du concept de l'élément chimique (Cf. I₀ et I₃) ont été supprimées afin de mieux dissocier les deux objets (invariant et concept). Nous ne nous appuyons plus sur les corpus pour argumenter les catégorisations – nous donnons à titre indicatif (dans le tableau ci-dessus), pour les deux niveaux de constructions intermédiaires, quelques exemples trouvés chez les élèves pour illustrer les catégories.

À partir du niveau de construction I₂, nous pouvons considérer que le repérage de l'invariant est enclenché (ce qui explique la coloration différenciée des trois dernières lignes). Le nouveau niveau de construction I₂ regroupe les deux anciens I₁ et I₂. À partir de I₃ nous pouvons considérer que l'identification de l'invariant est en très bonne voie.

III-2 Nouveaux niveaux de construction du concept

Lors de l'analyse du premier corpus « 24 rural », nous proposons une catégorisation du concept en trois niveaux de C₀ à C₂.

Niveaux de construction du concept utilisé pour le corpus « 24 rural »	
C ₀	<i>non acquis</i>
C ₁	<i>en cours d'acquisition</i>
C ₂	<i>vraisemblablement acquis</i>

Première proposition de catégorisation du concept

Afin, comme pour l'invariant, d'être au plus près de notre outillage théorique, nous proposons d'identifier trois indices essentiels non hiérarchisables à partir desquels nous pouvons proposer une nouvelle catégorisation du concept. Voici, ci-dessous, les trois indices retenus :

- 1- Cycle/ Boucle / Description cyclique / Écritures symboliques en boucle ou cycle
- 2- Transformations / Changement de formes
- 3- Cuivre sous différentes formes (états)

Nous proposons de codifier les nouveaux niveaux de construction du concept, au regard des présences au sein du corpus de ces trois « familles d'indices ».

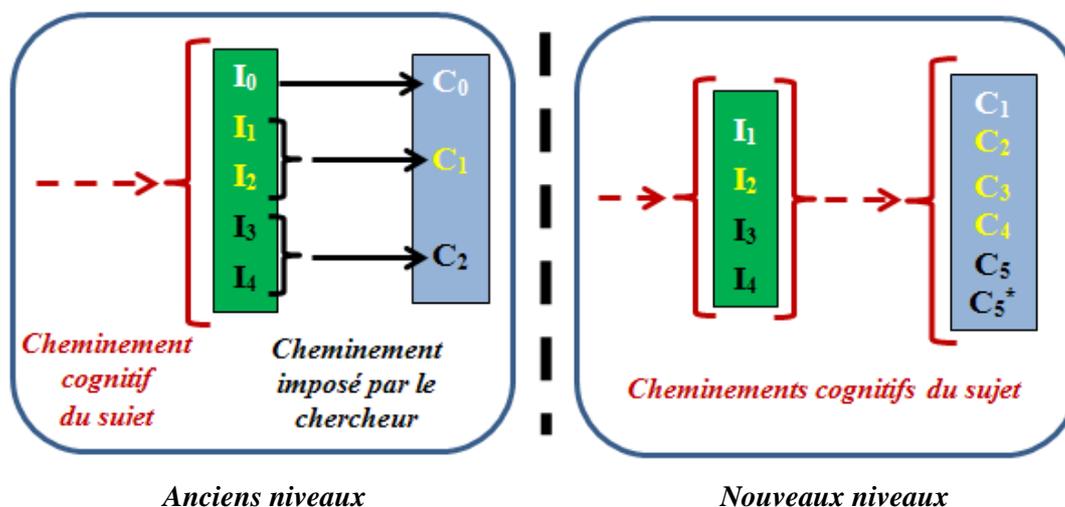
Nouveaux niveaux de construction du concept utilisés dans l'analyse croisée des trois corpus	
C1	Aucun des trois indices n'est présent
C2	Présence d'un des trois indices
C3	Présence de deux des trois indices
C4	Présence des trois indices mais absence d'explicitation et de généralisation
C5^(*)	Présence des trois indices avec explicitation – la conservation peut être explicitée. (et si généralisation (*)) [<i>« ça vaut le coup de parler d'élément »</i>]

Nouvelle catégorisation retenue pour le concept

La nouvelle catégorisation comporte désormais six niveaux de C₁ à C₅^{*}¹³ ; celle-ci permet de différencier de manière plus significative l'ancien niveau C₁ (*en cours d'acquisition*) et l'ancien niveau C₂ (*vraisemblablement acquis*). Les anciennes catégorisations C₁ et C₂ sont respectivement découpées¹⁴ en trois (C₂, C₃, C₄) et en deux (C₅, C₅^{*}).

Nous avons, comme pour l'invariant, coloré le tableau (dès C₂) pour marquer l'enclenchement de la construction du concept. À partir de C₃ nous pouvons considérer que le concept est en bonne voie d'acquisition et qu'il est très proche d'être acquis dès C₄ puisque toutes les pièces du puzzle sont présentes.

L'ancienne catégorisation liait, de fait, un niveau atteint de l'invariant à un niveau donné du concept. Ainsi nous pouvons donner les correspondances et les différences entre les deux catégorisations afin de mettre en évidence en quoi la nouvelle permet de mieux prendre en considération le cheminement de l'élève tout en s'appuyant sur des indices plus fiables.



Évolutions des deux catégorisations

¹³ Nous avons regroupé dans ce tableau les deux derniers niveaux C₅ et C₅^{*}.

¹⁴ Cf. *infra* page suivante pour la correspondance générale (identifiable par codage couleur)

S'agissant du concept, le nouveau niveau de construction C_1 (notée en blanc¹⁵ dans la schématisation de droite ci-dessus) correspond à l'ancien niveau de construction C_0 utilisée pour le corpus « 24 rural » (notée en blanc dans la schématisation de gauche ci-dessus).

IV- Nouveaux résultats de la seconde lecture

La première catégorisation utilisée avec le premier corpus « 24 rural » avait montré que, sur quinze liaisons invariant-concept possibles, seules cinq l'étaient réellement de par le choix contraint sélectionné à l'avance et cinq étaient atteintes *in fine*.

Avec la nouvelle proposition, ce sont vingt-quatre liaisons qu'il est possible d'obtenir. Nous en avons obtenu quinze différentes. Nous passons donc d'un tiers à deux tiers des liaisons possibles, ce qui témoigne de l'intérêt de ce souci d'ouverture pour aller chercher la diversité des élèves et ainsi mettre en avant la distribution cognitive des sujets.

IV-1 Les résultats pour l'invariant

Nous donnons pour chaque groupe, puis pour l'ensemble des trois corpus, les résultats qui rendent compte des niveaux de construction atteints pour l'invariant.

-Pour le corpus « 24 rural » (celui étudié en première lecture)

Tous les niveaux possibles sont atteints ; seul un élève (7%¹⁶ de l'effectif) n'a pas du tout su repérer l'invariant restant au niveau (I_1). Cinq élèves (35%) ont abordé l'invariant (I_2), deux élèves (14%) l'ont repéré de manière implicite (I_3) et enfin six élèves (42%) l'ont repéré explicitement (I_4).

CORPUS « 24rural »	I_1	I_2	I_3	I_4
	1	5	2	6
	7%	35%	14%	43%

-Pour le corpus « 972 »

Aucun n'élève n'a atteint le niveau (I_1). Six élèves (42%) ont abordé l'invariant (I_2), trois élèves (21%) l'ont repéré de manière implicite (I_3) et enfin cinq élèves (36%) l'ont repéré explicitement (I_4).

CORPUS « 972 »	I_1	I_2	I_3	I_4
	/	6	3	5
	/	42%	22%	35%

-Pour le corpus « 24 urbain »

Tous les niveaux possibles sont atteints ; seul un élève (6%) n'a pas du tout su repérer l'invariant restant au niveau (I_1). Quatre élèves (25%) ont abordé l'invariant (I_2), quatre élèves (25%) l'ont repéré de manière implicite (I_3) et enfin sept élèves (43%) l'ont repéré explicitement (I_4).

CORPUS « 24urbain »	I_1	I_2	I_3	I_4
	1	4	4	7
	6%	25%	25%	43%

Ces premiers résultats montrent qu'une majorité des élèves (62%) sur les trois corpus parvient à atteindre au moins le niveau (I_3) pour lequel l'invariant est, certes, non explicité mais bien appréhendé dans ses attributs. Ceci semble renforcer notre idée première selon laquelle le protocole expérimental est performant dans sa fonction de faire émerger l'invariant.

-Pour les trois corpus

Nous observons que seuls deux élèves sont passés « à côté » de l'invariant (I_1). Environ un tiers des élèves (I_2) ont enclenché son identification sans parvenir pour autant à observer l'ensemble de ses attributs (présence + continuité). Ce sont donc près des trois cinquièmes des élèves (I_3 et I_4) qui ont,

¹⁵ Le jeu des couleurs précise à lui seul les correspondances entre ancienne et nouvelle catégorisation de l'invariant et du concept.

¹⁶ Les pourcentages sont parfois arrondis à l'unité près

pour ainsi dire, « les cartes en main » pour « aller chercher » le concept, forts de cette identification, explicitée (I₄) pour 39%, restée implicite (I₃) pour 20%.

BILAN DES 3 CORPUS	I₁	I₂	I₃	I₄
	3	15	9	17
	7%	34%	20%	39%

L'implicite est-il suffisant pour venir à bout du concept ? Peut-on tutoyer le concept sans pour autant avoir approché l'invariant ? Si ces résultats sont encourageants pour ce qui est de l'invariant, ils ne peuvent plus (ayant coupé le cordon ombilical avec le concept) nous renseigner sur la manière dont le concept va être abordé par les élèves. Les résultats des niveaux de constructions atteints du concept que nous présentons maintenant, nous donneront des éléments d'appréciation sur toutes ces questions et bien d'autres, nous l'espérons.

Nous donnons quelques extraits tirés des trois corpus, les mettant ainsi en regard des niveaux de constructions de l'invariant atteints par chaque élève (chaque élève d'un des trois groupes est identifié par une lettre avec une police spécifique).

Extraits tirés du corpus « 24 rural »	I_x	ÉLÈVE
<i>Le cuivre du début jusqu'à la fin</i>	I4	A
<i>On retrouve le métal cuivre</i>	I2	B
<i>Au cours de chaque expérience, on retrouve à chaque fois l'élément cuivre</i>	I4	C
<i>L'élément chimique cuivre est toujours présent</i>	I4	D
<i>Rien ne se perd....</i>	I3	E
<i>Je crois que le cuivre était toujours présent</i>	I4	F
<i>Nous retrouvons le résultat de la première expérience + entretien (présence continue)</i>	I4	G
<i>On a retrouvé le cuivre sous sa forme solide</i>	I2	H
<i>Schématisations enchaînées avec couleurs cohérentes</i>	I3	I
<i>On revenait à l'obtention du métal cuivre</i>	I2	J
<i>On revenait à notre point de départ, l'obtention du métal cuivre</i>	I2	K
<i>Réapparition du cuivre</i>	I2	L
<i>Présence du métal cuivre à la fin de la 4^e expérience</i>	I2	M
<i>Réapparition du cuivre ou de l'oxyde de cuivre</i>	I1	N

Extraits tirés du corpus « 972 »	I_x	ÉLÈVE
<i>Le cuivre est resté présent durant toutes les expériences</i>	I4	A
<i>On retrouve le cuivre</i>	I2	B
<i>Le cuivre a toujours été présent</i>	I4	C
<i>Le cuivre a toujours subsisté</i>	I4	D
<i>Dans chaque expérience il restait des traces du cuivre</i>	I3	E
<i>Enfin le cuivre n'a pas disparu pendant toutes ces transformations</i>	I3	F
<i>Le cuivre, il restera toujours des particules – Le cuivre n'avait donc pas disparu</i>	I3	G
<i>Le cuivre présent</i>	I4	H
	I1	I
<i>Description enchaînée des expériences</i>	I2	J
<i>Je pensais que nous l'avions perdu mais à l'aide d'un cycle nous avons pu le retrouver</i>	I2	K
<i>Le cuivre n'avait pas disparu, il était là mais on ne le voyait pas</i>	I4	L
<i>le (cuivre) faire réapparaître</i>	I2	M
<i>On part du cuivre pour finalement le reconstituer</i>	I2	N

Extraits tirés du corpus « 24 urbain »	I _x	ÉLÈVE
<i>Dans toutes les expériences il y a du cuivre</i>	I4	A
<i>Le cuivre est présent dans l'expérience depuis le début</i>	I4	B
<i>Nous avons recréé du cuivre</i>	I2	C
<i>Au fil des expériences il y avait toujours du cuivre</i>	I4	D
<i>Je pense que le cuivre ne s'est jamais échappé</i>	I3	E
<i>Dans toutes les expériences il y a du cuivre</i>	I4	F
<i>Le cuivre que j'ai mis au début est resté</i>	I3	G
<i>Le cuivre ne s'est jamais échappé, il n'a jamais disparu</i>	I3	H
<i>Puis à la fin le cuivre est de nouveau apparent</i>	I2	I
<i>Le cuivre était présent dans toutes les expériences</i>	I4	J
<i>Il reste une trace de sa présence. Il revient à son état initial</i>	I3	K
	I1	L
<i>Je pense que le cuivre a été présent tout le long de l'expérience</i>	I4	M
<i>Je pense que le cuivre a toujours été présent</i>	I4	N
<i>Reformation du métal cuivre</i>	I2	O
<i>Obtention du métal cuivre</i>	I2	P

IV-2 Les résultats pour le concept

Nous donnons désormais pour chaque groupe puis, pour l'ensemble des trois corpus, les résultats qui rendent compte des niveaux de constructions atteints pour le concept.

-Pour le corpus « 24 rural »

Tous les niveaux possibles sont atteints à l'exception du niveau C₄; on observe une répartition équivalente (21,5%) sur les trois premiers niveaux. On note également une proportion importante d'élèves (plus d'un tiers) qui parviennent à atteindre les deux niveaux qui attestent de la construction du concept (C₅ et C₅*).

CORPUS « 24rural »	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₅ *
	3	3	3	/	2	3
	21,5%	21,5%	21,5%	/	14%	21,5%

-Pour le corpus « 972 »

Seul un élève ne construit pas le concept (C₁). Aucun n'élève ne parvient à atteindre les deux niveaux (C₅ et C₅*), mais deux ont su identifier les trois familles d'indices (C₄). En outre, une majorité est parvenue à identifier deux des trois familles d'indices (C₃).

CORPUS « 972 »	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₅ *
	1	5	6	2	/	/
	7%	35,5%	43%	14%	/	/

-Pour le corpus « 24 urbain »

Uniquement trois des six niveaux possibles sont atteints. Aucun élève n'est parvenu à repérer l'ensemble des indices qui rendent compte du concept (C₄ et au-delà). Une proportion importante d'élèves n'a pas été en mesure de débiter la construction du concept (C₁).

CORPUS « 24urbain »	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₅ *
	6	6	4	/	/	/
	37,5%	37,5%	25%	/	/	/

L'ensemble de ces premiers résultats montrent qu'environ 45% des élèves (20 sur 44) parviennent à atteindre au moins le niveau (C₃) pour lequel le concept est en bonne voie d'identification, ce qui est un constat plutôt satisfaisant.

Nous observons que dix élèves, soit environ un cinquième (22%) de l'effectif total, sont passés « à côté » du concept (C₁). Un tiers (32%) des élèves a enclenché son identification (C₂). Un peu moins d'un autre tiers (30%) l'a « approché » de très près en identifiant deux des trois indices qui le définissent (C₃). Nous notons, avec une pincée « d'admiration », qu'un peu plus d'un septième des élèves (7/44) est parvenu, à « tenir » le concept d'élément chimique à l'issue du protocole en identifiant les trois indices retenus (C₄ et au-delà). Cette performance est à saluer car nous rappelons

qu'aucun guidage, qu'aucune indication de quelque nature que ce soit n'a été donnée par les enseignants au cours des expérimentations.

Enfin, que dire des cinq élèves qui atteignent les niveaux C₅ et C₅*, et qui parviennent à construire avec justesse le concept tout en allant même, pour trois d'entre eux, jusqu'à le généraliser à d'autres éléments !!

BILAN DES 3 CORPUS	C₁	C₂	C₃	C₄	C₅	C₅*
	10	14	13	2	2	3
	22%	32%	30%	4,5%	4,5%	7%

Ces résultats témoignent d'une grande diversité de comportements cognitifs. Cela ne peut pas nous surprendre dans la mesure où face à « l'inconnue », les individus se frayent des cheminements très divers. Ces processus nous intéressent tout particulièrement.

Nous donnons, à titre d'exemple, pour les trois groupes, quelques extraits tirés des différents corpus en les mettant ainsi en regard des niveaux de constructions du concept atteints par chaque élève (la procédure d'identification des élèves est la même que pour l'invariant).

Extraits tirés du corpus « 972 »	C_y	ÉLÈVE
<i>Le cycle du cuivre – le cuivre est sous différentes formes</i>	C3	A
<i>On a du cuivre sous différentes formes durant toutes les expériences</i>	C3	B
<i>Le cuivre au cours de ses différentes formes</i>	C2	C
<i>Le cycle du cuivre – au fur et à mesure le cuivre prenait différentes formes</i>	C3	D
<i>On peut transformer le cuivre en différentes formes</i>	C3	E
<i>Les transformations du cuivre sous différentes formes</i>	C3	F
<i>Le cycle du cuivre</i>	C2	G
<i>Le cuivre sous ses différentes formes – il s'est opéré un cycle – le cuivre a été transformé sous plusieurs formes</i>	C4	H
<i>Le cuivre sous ses différentes formes le cuivre a été transformé à plusieurs reprises – « retour » à une forme initiale</i>	C4	I
<i>Le cuivre sous toutes ses différentes formes – le cuivre a subi plusieurs transformations -</i>	C3	J
<i>Le cycle du cuivre</i>	C2	K
	C1	L
<i>Le cuivre sous différents états</i>	C2	M
<i>Cela fait un cycle avec le cuivre</i>	C2	N

Extraits tirés du corpus « 24 rural »	C_y	ÉLÈVE
<i>La conservation de l'élément cuivre -</i>	C5	α
<i>On garde les mêmes éléments chimiques au cours de toutes les transformations</i>	C5*	β
<i>La conservation des éléments chimiques</i>	C5*	ε
<i>Conservation d'un élément chimique – c'est le cas pour n'importe quel élément</i>	C5*	δ
<i>Rien ne se perd, rien ne se crée tout se transforme – tous les éléments chimiques se transforment à l'infini</i>	C3	ε
<i>Le cuivre sous différentes formes – description cyclique</i>	C3	ζ
<i>Par conséquent nous avons en quelque sorte une boucle + entretien (conservation)</i>	C5	η
<i>La boucle des réactions chimiques entre les éléments – un élément peut réagir avec d'autres et se transformer mais on le retrouve sous sa forme première</i>	C3	θ
<i>Schématisation d'un cycle – liens entre les expériences</i>	C2	ι
<i>Nous avons à faire à une boucle</i>	C2	κ
<i>Ces 4 expériences correspondent en quelque sorte à une « boucle »</i>	C2	κ
	C1	λ
	C1	μ
<i>On peut le mélanger ou le « redémélanger »</i>	C1	ν

Extraits tirés du corpus « 24 urbain »	C _y	ÉLÈVE
<i>Les différents états du cuivre – transformations chimiques</i>	C3	A
<i>Le cuivre sous toutes ses formes</i>	C2	B
<i>Feuille bilan vierge</i>	C1	C
	C1	D
<i>Le cuivre change d'aspect tout au long des expériences</i>	C2	E
<i>Les différents états du métal cuivre – il y a du cuivre sous différentes formes</i>	C2	F
<i>Il apparaît sous plusieurs formes</i>	C2	G
<i>Le cuivre disparaît-il vraiment ?</i>	C1	H
<i>Le cuivre subit plusieurs transformations</i>	C2	I
<i>Le cuivre sous toutes ses formes</i>	C2	J
	C1	K
<i>Le cuivre a changé de formes – cette série d'expériences est une boucle</i>	C3	L
<i>Feuille bilan vierge</i>	C1	M
<i>Présence du cuivre sous différentes formes – ces expériences sont une boucle (la vie du cuivre)</i>	C3	N
<i>Feuille bilan vierge</i>	C1	O
<i>Schéma d'un cycle / Fléchage + différentes formes</i>	C3	P

Nous allons maintenant croiser les résultats obtenus des niveaux de constructions de l'invariant et du concept pour chaque élève.

IV-3 Les résultats des liaisons Invariant-Concept [I_x-C_y]

IV-3-1 Première niveau d'analyse

Liaisons [I _x -C _y] « 24 rural »			Liaisons [I _x -C _y] « 972 »			Liaisons [I _x -C _y] « 24urbain »		
I _x	C _y	ÉLÈVE	I _x	C _y	ÉLÈVE	I _x	C _y	ÉLÈVE
I4	C5	<i>a</i>	I4	C3	A	I4	C3	A
I4	C5*	<i>B</i>	I2	C3	B	I4	C2	B
I4	C5*	<i>c</i>	I4	C2	C	I2	C1	C
I4	C5*	<i>D</i>	I4	C3	D	I4	C1	D
I3	C3	<i>E</i>	I3	C3	E	I3	C2	E
I4	C3	<i>F</i>	I3	C3	F	I4	C2	F
I4	C5	<i>G</i>	I3	C2	G	I3	C2	G
I2	C3	<i>H</i>	I4	C4	H	I3	C1	H
I3	C2	<i>I</i>	I2	C4	I	I2	C2	I
I2	C2	<i>J</i>	I2	C3	J	I4	C2	J
I2	C2	<i>K</i>	I2	C2	K	I3	C1	K
I2	C1	<i>L</i>	I4	C1	L	I1	C3	L
I2	C1	<i>M</i>	I2	C2	M	I4	C1	M
I1	C1	<i>N</i>	I2	C2	N	I4	C3	N
						I2	C1	O
						I2	C2	P

Liaisons [I_x-C_y] atteintes, classées par corpus et par élève

Nous indiquons à travers les trois tableaux ci-dessus, la qualité des liaisons [I_x-C_y] invariant-concepts atteintes par chaque élève pour chaque groupe, à l'issue du protocole expérimental. La première lecture montre qu'il existe 15 liaisons différentes. Le corpus « 24 rural » en contient 9, le corpus

« 972 » en contient 10, et le corpus « 24 urbain » en contient 9. Il y a une grande homogénéité¹⁷ dans la diversité des trois groupes malgré la différence importante des contextes.

Nous pointons immédiatement les liaisons les plus marquées qui interrogent (notées en surlignage bleu-ciel dans les tableaux) et mettent à mal une grande « intimité »¹⁸ possible entre invariant et concept. En effet, ces liaisons montrent toutes qu'il semble envisageable de tenir l'invariant sans être en mesure de tenir le concept. Bien que cela ne concerne que très peu d'élèves (3 au total sur les trois groupes), une analyse plus approfondie de ces corpus nous semble digne d'intérêt. Nous en présenterons les grandes lignes par la suite.

En revanche, nous ne trouvons pas de liaison qui indiquerait qu'il soit envisageable de tenir parfaitement le concept (C₅) sans avoir tenu l'invariant (I₄). Par ailleurs, le fait de ne pas construire l'invariant (I₁) apparaît comme un obstacle pour construire le concept.

Nous avons là une indication particulièrement intéressante au regard de l'hypothèse de cette recherche. Afin de poursuivre plus avant notre lecture des liaisons, nous avons construit un autre outil (tableau ci-dessous) qui présente une meilleure ergonomie.

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₅ *	TOTAL
I ₁	1		1				2
I ₂	4	7	3	1			15
I ₃	2	4	3				9
I ₄	3	4	5	1	2	3	18
TOTAL	10	15	12	2	2	3	

Bilan des niveaux de construction de l'invariant et du concept pour les trois corpus

La lecture des résultats permet les "inférences évaluatives" suivantes :

- Un élève n'aborde ni la construction de l'invariant ni celle du concept ([I₁-C₁]).
- Un élève est en train de construire le concept mais pas l'invariant ([I₁-C₃]).
- Six élèves sont en train de construire l'invariant mais pas le concept ([I₂-C₁]- [I₃-C₁]).
- **Trois** élèves ont construit l'invariant sans investir le concept ([I₄-C₁]).
- Dix-huit élèves sont en train de construire l'invariant et le concept ([I₂-C₂]- [I₂-C₃]- [I₂-C₄]- [I₃-C₂]- [I₃-C₃]) ; ils sont majoritaires (61%), ce qui est encourageant compte tenu des circonstances d'apprentissages (positionnement d'écoute et d'encadrement de l'enseignant).
- Onze élèves ont construit l'invariant et sont en train de construire le concept ([I₄-C₂]- [I₄-C₃]- [I₄-C₄]).
- Cinq élèves ont construit l'invariant et le concept ([I₄-C₅]- [I₄-C₅*]).

Nous actons l'absence des liaisons [I₃-C₄ *et au-delà*] qui pourraient illustrer l'importance de l'invariant dans la construction du concept. Nous observons par ailleurs l'absence des liaisons [I₁-C₄ *et au-delà*] mais aussi [I₂-C₅ *et au-delà*] ce qui nous paraît plus cohérent dans une logique d'intimité. En outre, dès l'amorce (I₂) de la construction de l'invariant, la construction du concept est très majoritairement enclenchée (C₂ à C₄).

Enfin, comme pour les trois liaisons repérées précédemment de forme ([I₄-C₁]), la liaison [I₂-C₁] demande à être étudiée de plus près.

En résumé, et contrairement à la première lecture qui pouvait aboutir à la formulation « *pas d'invariant, pas de concept et réciproquement* », nous pouvons à la lumière de ces nouveaux résultats tenter d'avancer l'*hypothèse forte*, ci-dessous, qu'il faudrait éprouver sur d'autres contextes scientifiques ciblant d'autres concepts.

Hypothèse « forte » : « **Il est difficile de construire le concept d'élément chimique sans avoir construit son invariant** » ce qui pourrait se résumer par « *tenir le concept impose de tenir l'invariant* »

¹⁷ Un groupe a un effectif supérieur aux deux autres (16 élèves pour 14 élèves aux deux autres).

¹⁸ Qui s'était traduite par une exclusivité lors de la première analyse au chapitre précédent.

Dans le contexte de l'apprentissage du concept au lycée, en seconde générale, nous pouvons proposer cette seconde hypothèse que nous qualifierons *d'hypothèse faible*.

Hypothèse « faible » : « Parvenir à construire son invariant doit faciliter la construction du concept d'élément chimique » ce qui pourrait se résumer par « tenir l'invariant facilite l'accès au concept ».

IV-3-2 Second niveau d'analyse

Nous revenons sur les liaisons qui nous interrogent plus particulièrement à savoir [I₄-C₁] et [I₂-C₄] pour lesquelles l'élève tient l'invariant mais n'a pas du tout entrepris le concept ou s'est approché du concept de très près sans pour autant avoir pris « toute la mesure » de l'invariant.

Cas des trois élèves : L « 972 » – D et M « 24 urbain » qui atteignent les liaisons [I₄-C₁].

-Pour L « 972 », sa filiation cognitive est : [I₄-C₁] / R1[7/7] / R2 [8/8] / R1-R2[6/5].

En comparant cette filiation avec la moyenne¹⁹ de celles obtenues par les élèves ayant atteint la liaison [I₄-C₂], nous observons que cet élève produit une quantité plus importante de représentations, toutes catégories confondues, alors que c'est le contraire par rapport à la moyenne des élèves qui atteignent la liaison [I₄-C₃].

Cet élève, tout au long du protocole, alterne entre « le meilleur » et « le pire ».

« Et je ne pense pas que quand le cuivre se dissout le cuivre dans l'acide, il devient bleu » (sic)

La coloration n'est pas identifiée comme étant due à la présence des ions cuivres.

« Je pense qu'il y a eu une espèce de fusion entre la solution précédente et la soude. C'est pour cela que l'on a obtenu un solide ».

Il y a une évocation de changement d'état qui n'en est pas un.

« ..l'eau de chaux s'est troublée et est devenu blanc presque gris. Ce qui signifie que l'on avait du dioxygène qui s'échappait de l'autre tube ».

Il y a erreur sur l'identification du gaz formé (dioxygène au lieu du dioxyde de carbone).

« Non en fait on est parti du cuivre et on est arrivé au dioxygène »

Les trois indices du concept sont absents.

« Du cuivre au dioxygène » est le titre proposé.

L'idée de conservation par transformation n'est pas du tout entrevue.

« ...le solide noir est devenu orange donc on a vu du cuivre ». « Je pense que cette série d'expériences nous a permis d'observer particulièrement le cuivre ». « On a pu voir qu'en fait le cuivre n'avait pas disparu, il était là mais on ne le voyait pas »

L'idée de continuité est bien présente. La difficulté à identifier certaines espèces a pu nuire à la réflexion générale pour construire le concept. Cet élève « se cherche », hésite, tente de se frayer un chemin sans parvenir à prendre « le bon ». L'agitation neurologique est bien présente en témoigne le nombre de représentations produit au cours du protocole en particulier de type R1-R2 (11 pour une moyenne de 9,5 toutes liaisons [I₄-C_y] confondues).

-Pour D « 24 urbain », sa filiation cognitive est : [I₄-C₁] / R1[6/2] / R2 [3/8] / R1-R2[4/0].

Cet élève a peu décrit et peu interprété (un tiers de représentation en moins que la moyenne).

Les descriptions qui sont données sont parfois erronées « Je pense que le cuivre s'est évaporé en fumée ...à la fin de l'expérience le cuivre disparaît » ou demeurent « à ras le geste » pour les expériences 2 et 3. Lors de l'expérience 4, le déclic sur l'invariant se manifeste « ...au fil des expériences il y avait toujours un peu de cuivre » et il est confirmé dans le bilan « Je pense que quoi que nous fassions il restera toujours du cuivre ».

Toutefois cet élève, à aucun moment dans son compte rendu, ne fait allusion aux noms des espèces formées contenant l'élément chimique cuivre, hormis la forme métallique lors de sa formation finale. A plusieurs reprises, le verbe *devenir* est employé comme si les espèces formées l'étaient par enchantement. L'idée de transformation et de formes pour les espèces n'apparaît jamais et pourtant l'idée de continuité de présence est explicitement formulée. Tout s'est passé comme si l'invariant avait phagocyté toute son attention, le côté spectaculaire de la formation du métal cuivre en fin d'expérience avait pris le dessus sur tout le reste.

¹⁹ Cf. infra chap VIII (I-1-1) pour observer les différents tableaux qui croisent liaisons et représentations

Cette impression générale de *flottement cognitif* est renforcée par la proposition de titre : « *Savoir obtenir du cuivre* » qui ne fait ni la part belle au concept, ni à l'invariant, mais renvoie uniquement à un aspect pratique du protocole.

-Pour M « 24 urbain », sa filiation cognitive est : [I₄-C₁] / R1[5/2] / R2 [1/8] / R1-R2[1/0].

Cet élève n'a renseigné ni les zones « *Mon point de vue* » des deux premières expériences ni la feuille « *Mon bilan* ». Le profil général est très similaire au précédent. Seule l'expérience 4 sauve la mise « *Je pense que le cuivre a été présent tout au long de l'expérience* ».

En revanche, le titre est très ambigu : « *Passage à plusieurs étapes de l'état du cuivre* ». Il y a confusion entre état de la matière des corps purs et état des espèces dans lesquelles se retrouve l'élément chimique cuivre. En cela, les différentes formes sont peut-être senties, mais l'idée reste sous-jacente, voire mal exprimée.

-Cas de l'élève I « 972 » qui atteint la liaison [I₂-C₄].

Sa filiation cognitive est : [I₂-C₄] / R1[5/3] / R2 [7/5] / R1-R2[6/1].

Le compte rendu de cet élève fait apparaître que, dès la seconde expérience, il se situe sur des considérations de transformations : « *Je constate qu'il y a une transformation de la solution bleue en solide bleu...* » - « *les deux solutions ont fusionné et ont formé une substance solide* » qui sont d'ordres microscopiques. Pour autant, il relate des informations d'ordre macroscopique qui vont dans le sens de l'invariant, mais sa continuité est sous-jacente par défaut, sans être développée : « *...le liquide après la filtration n'est pas de couleur bleu car le cuivre a été repêché par le filtre* ». La continuité de l'élément cuivre est sous-jacente mais non-explicitée. De nouveau dans la troisième expérience on peut lire : « *...la chaleur transforme le solide bleu en une autre forme* ». Ici l'élève est sur la route du concept sans passer par l'invariant ; en effet quelle est cette autre forme dont il parle ? Dans la dernière expérience l'élève évoque clairement « *...le cuivre est revenu sous sa forme initiale* », évocation que nous avons codée I₂ et qui est la seule du compte rendu ciblée explicitement sur l'invariant. Tout laisse penser que cet élève avait senti l'invariant tant ses propos sont implicites, néanmoins les explicites ne sont pas sortis.

En revanche, l'impression très favorable s'agissant du concept tout au long de la lecture du compte rendu est confirmée par le bilan : « *Le cuivre a été transformé à plusieurs reprises pour revenir à une forme initiale* » et par le titre : « *Le cuivre sous ses différentes formes* » ce qui lui vaut d'atteindre C₄ et une liaison d'apparence surprenante mais qui finalement s'explique par le fait qu'il se soit focalisé sur les aspects transformationnels (les plus compliqués) plutôt que sur des aspects identitaires (les plus simples *a priori*).

Pour tous ces élèves, le fait de ne pas systématiquement identifier les espèces mises en jeu peut s'avérer un réel handicap pour construire l'idée de continuité de présence portée par l'invariant. Quand le métal cuivre se reforme à la quatrième expérience, le déficit d'information sur les espèces chimiques aboutit soit à une réflexion centrée sur l'invariant « *en fait le cuivre était là tout le temps* » comprendre « je ne m'en étais pas rendu compte », ou bien centrée sur le concept, « *il s'est transformé puisqu'on ne le retrouve qu'à la fin* » (comprendre « il a dû changer de formes au cours du protocole ».)

Ces cas de figures « exotiques²⁰ » nous apprennent que le processus d'identification au fur et à mesure doit jouer un rôle important dans le processus d'apprentissage. En outre, les représentations construites pas les élèves sont susceptibles d'aider ou de guider les élèves sur les deux voies, celle de l'invariant et celle du concept.

En conclusion, l'ensemble de ces résultats nous permet d'apporter un éclairage nouveau par rapport à notre première lecture effectuée sur le corpus « 24 rural ».

Nous avançons que la construction du concept d'élément chimique est pour ainsi dire assujettie à celle de son invariant. En outre, si construire l'invariant n'est pas un passeport pour la construction du concept, force est de constater qu'il la favorise. Le passage de I₃ à I₄ accroît le nombre d'élèves qui sont en cours de construction du concept de +114% (de 7 à 15) et permet

²⁰ Dans le sens où elles semblent aller à l'encontre du lien invariant-concept

l'accès à sa construction de manière exclusive pour 5 élèves. Peut-on honnêtement ignorer ce qui s'offre²¹ à nous ?

Nous allons, dans le chapitre suivant, nous intéresser aux représentations construites par les élèves au cours du scénario, afin d'observer les relations entre elles et la qualité de la liaison $[I_x-C_y]$ atteinte. Ceci nous permettra d'étayer nos suggestions dans une logique d'amélioration du scénario pédagogique qu'il serait intéressant de mettre en place dans la classe.

Puis nous proposerons de réfléchir au statut qu'il serait intéressant de conférer aux invariants tant ils semblent se positionner comme des alliés puissants dans la conquête des concepts scientifiques.

²¹ Il y a comme une saveur Galiléenne dans ces résultats.

Synthèse de ce chapitre

-L'analyse des *filiations cognitives* des sujets nous renseigne sur l'émergence de l'invariant et la construction du concept d'élément chimique ainsi que sur le rôle probable des représentations construites en cours d'apprentissage. Les représentations rationnelles (R2 et R1-R2) semblent jouer un rôle important dans la construction d'un concept scientifique sans qu'un *effet bénéfique* R1 puisse être écarté. Ces renseignements sont de nature à réguler les scénarios pédagogiques dans la perspective de faire découvrir les concepts scientifiques par la démarche d'investigation.

- Plutôt que de chercher à catégoriser les concepts scientifiques, peut-être pourrions-nous catégoriser les invariants, dans une logique pluridisciplinaire et une perspective de formation. Nous proposons à ce stade plusieurs catégories pour les invariants qu'il serait envisageable de retenir : les invariants : *par collection, par conservation-transformation, par équilibre et par adaptation*. Nous invitons toutes les disciplines à définir la nature des invariants susceptibles de les représenter, afin de poursuivre cette réflexion.

I-Analyse des représentations des élèves au cours du scénario

Dans le chapitre précédent, nous avons pu observer qu'il existait vraisemblablement une « intimité » entre le concept d'élément chimique et son invariant. Dans un souci d'information vers les enseignants, nous voulons rechercher si les représentations des élèves impactent leur capacité à construire les meilleures liaisons possibles. Nous ambitionnons ainsi de suggérer quelques recommandations susceptibles d'améliorer l'apprentissage du concept d'élément chimique et qu'elles soient directement transférables en classe. Le chercheur n'imagine pas se substituer au professionnel de terrain mais juste lui apporter quelques idées qu'il pourrait éventuellement tester en situation.

I-1 Bilan des filiations cognitives avec la catégorisation [I_x-C_y] de la seconde lecture

I-1-1 Les résultats des trois groupes « 24 urbain », « 972 », « 24 rural »

Liaisons [I _x -C _y] « 24urbain »		R1			Indices R2			R1-R2			ÉLÈVE
		a	b	Total	c	d	Total	e	f	Total	
I4	C3	8	2	10	7	10	17	8	1	9	A
I4	C3	6	1	7	8	15	23	6	2	8	N
I1	C3	3	3	6	5	4	9	5	2	7	L
		5,7	2	7,7	6,7	9,6	16,3	6,3	1,7	8	
I4	C2	6	2	8	6	10	16	5	1	6	F
I4	C2	4	3	7	4	9	13	3	1	4	J
I4	C2	5	2	7	5	6	11	4	0	4	B
I3	C2	3	5	8	6	9	15	5	1	6	G
I3	C2	5	2	7	8	11	19	4	3	7	E
I2	C2	7	5	12	7	8	15	7	0	7	I
I2	C2	13	2	15	8	7	15	6	2	8	P
		6,1	3	9,1	6,2	8,5	14,7	4,8	1,1	6	
I4	C1	5	2	7	1	8	9	1	0	1	M
I4	C1	6	2	8	3	8	10	4	0	4	D
I3	C1	4	4	8	7	14	21	4	3	7	H
I3	C1	5	3	8	5	11	16	7	1	8	K
I2	C1	3	3	6	5	2	7	4	1	5	C
I2	C1	7	2	9	4	6	10	3	2	5	O
		5	2,7	7,7	4,1	8,2	12,3	3,8	1,1	5	
TOTAL		90	43	133	89	138	226	76	20	96	
Moyenne/élève		5,6	2,7	8,3	5,5	8,6	14,1	4,8	1,2	6	

Bilan ci-dessus des filiations cognitives¹ pour le groupe « 24 urbain »
Bilans page suivante des filiations cognitives pour les groupes « 972 » et « 24 rural »

¹ Cf. supra. Chap VI (II-2-2) pour les codages utilisés

Liaisons [I _x -C _y] « 972 »		R1			Indices R2			R1-R2			ÉLÈVE
		a	b	Total	c	d	Total	e	f	Total	
I4	C4	4	1	5	9	10	19	11	2	13	H
I2	C4	5	3	8	7	5	12	6	1	7	I
		4,5	2	6,5	8	7,5	15,5	8,5	1,5	10	
I4	C3	6	7	13	8	8	16	7	3	10	A
I2	C3	8	6	14	3	7	10	5	/	5	B
I4	C3	6	2	8	8	14	22	6	/	6	D
I3	C3	5	3	8	7	8	15	8	/	8	E
I3	C3	8	3	11	5	5	10	6	1	7	F
I2	C3	7	6	13	6	16	22	10	1	11	J
		6,7	4,5	11,1	6,2	9,6	15,8	7	0,8	7,8	
I2	C2	4	1	5	8	7	15	7	1	8	M
I2	C2	7	2	9	6	7	13	6	1	7	N
I3	C2	5	3	8	3	5	8	3	2	5	G
I2	C2	2	1	3	6	7	13	5	4	9	K
I4	C2	6	4	10	8	9	17	4	1	5	C
		4,8	2,2	7	6,2	7	13,2	2	1,8	3,8	
I4	C1	7	7	14	8	8	16	6	5	11	L
TOTAL		80	49	129	89	119	208	90	22	112	
Moyenne/élève		5,7	3,5	9,2	6,3	8,5	14,8	6,4	1,6	8	

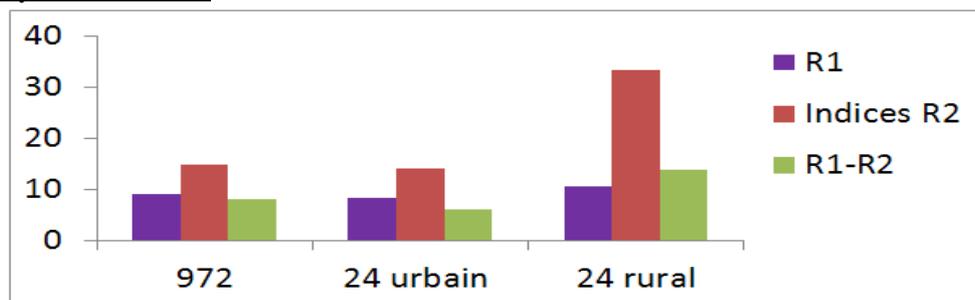
Liaisons [I _x -C _y] « 24rural »		R1			Indices R2			R1-R2			ÉLÈVE
		a	b	Total	c	d	Total	e	f	Total	
I4	C5	9	8	17	15	25	40	12	3	15	<i>a</i>
I4	C5*	7	12	19	12	30	42	20	2	22	<i>B</i>
I4	C5*	6	7	11	17	41	58	16	1	17	<i>c</i>
I4	C5*	10	7	17	18	20	36	16	4	20	<i>D</i>
I4	C5	7	3	10	15	14	29	8	2	10	<i>ç</i>
		7,8	7,4	15,2	15,4	26	41,4	14,4	2,4	16,8	
I4	C3	8	4	12	14	19	33	17	1	18	<i>F</i>
I3	C3	6	2	8	6	9	15	8	2	10	<i>E</i>
I2	C3	7	5	12	7	13	20	10	3	13	<i>H</i>
		7	4	11	9	13,7	22,7	11,7	2	13,7	
I3	C2	5	2	7	10	11	21	8	2	10	<i>J</i>
I2	C2	6	5	11	11	11	22	7	3	10	<i>J</i>
I2	C2	5	3	8	16	19	35	9	3	12	<i>K</i>
		5,3	3,3	8,6	12,3	13,7	26	7,7	2,7	10,4	
I2	C1	6	4	10	15	30	45	11	1	12	<i>L</i>
I2	C1	3	2	5	13	17	30	8	2	10	<i>M</i>
I1	C1	8	6	14	9	32	41	16	1	17	<i>N</i>
		5,7	4	9,7	12,3	26,3	38,6	11,7	1,3	13	
TOTAL		93	70	163	178	292	470	166	30	196	
Moyenne/élève		6,6	5	11,6	12,7	20,8	33,5	11,9	2,1	14	

Ces tableaux se lisent de manière horizontale, chaque ligne donnant la *filiation cognitive*² d'un sujet en débutant par sa liaison invariant-concept [I_x-C_y].

Une ligne (en surlignage bleu) donne les moyennes atteintes des représentations pour chaque groupe de sujets établis au regard des niveaux de construction du concept. Les niveaux C5 et C5*, ici, ont été regroupés. En bas des tableaux, une première ligne « TOTAL », indique le nombre total de représentations du groupe pour une catégorie donnée, une seconde ligne « Moyenne/élève » indique le nombre moyen de représentations construites par élève pour une catégorie donnée.

Ces tableaux se lisent également de manière verticale chaque colonne donnant le nombre de représentations construites pour une catégorisation donnée. Trois colonnes « Total » précisent le total des représentations par catégorie (R1 – Indices R2 – Coordinations R1-R2).

I-1-2 Analyse des résultats



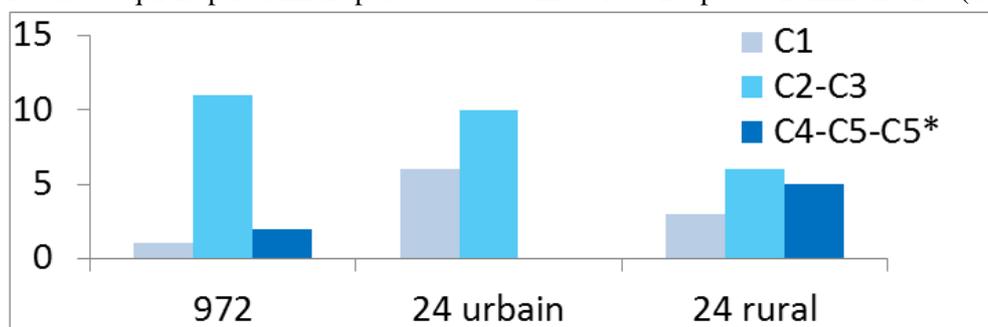
Bilans des catégories de représentations des trois groupes à partir des moyennes par élèves

- Nous pouvons observer que, pour les trois classes de seconde générale du lycée, la répartition des catégories de représentations est plutôt similaire pour deux d'entre elles : « 972 » et « 24 urbain », mais très différente de « 24 rural ». Dans cette dernière, la construction des indices R2 et des coordinations R1-R2 est plus présente, les différences sur ces représentations avec les deux autres groupes étant spectaculaires. En effet, si l'on compare les très proches moyennes des deux groupes « 972 » et « 24 urbain » avec celles du groupe « 24 rural », nous obtenons, en faveur du dernier groupe cité, environ +115% pour les indices R2 et +100% pour les R1-R2. Le détail des sous-catégories des représentations montrent que, s'agissant de celles qui « touchent » plus spécifiquement l'invariant de près, les différences s'établissent ainsi : +18 % pour les R1(a), + % 115 pour les R2(c) et + % 112 pour les R1-R2(e).

- Nous pouvons observer à partir de l'histogramme ci-dessous, qui présente l'effectif des élèves pour chaque classe en fonction du niveau de construction³ du concept atteint, qu'il existe quelques points communs mais aussi quelques différences significatives.

Dans les trois classes :

- la majorité des élèves est dans une dynamique de construction du concept (C2-C3).
- les élèves qui ne parviennent pas du tout à « lire » le concept » sont minoritaires (C1)



Bilans des niveaux de constructions du concept d'élément chimique des trois groupes

² Cf. *supra* Chap VI (II-2-2) pour revenir sur les explications des différentes catégories de représentations

³ Nous différencions le niveau C1 pour lequel le concept n'est pas abordé, des niveaux C2-C3 pour lesquels le concept est en construction, des niveaux C4-C5 et C5* pour lesquels le concept est considéré comme étant tenu.

(Différence 1) Une des classes, « 24 urbain », ne contient pas d'élèves dans les catégories (C4-C5-C5*) qui sont au plus près du concept.

(Différence 2) Bien qu'ayant des profils de construction des représentations très proches, la classe « 972 » construit mieux le concept que la classe « 24 urbain ».

(Différence 3) Une des classes, « 24 rural », présente un profil dans lequel les élèves construisent mieux le concept que dans les deux autres.

Nous allons rechercher ce qui pourrait expliquer ces trois différences (D1, D2 et D3) en croisant les résultats des représentations et celles des niveaux de construction du concept.

Nous observons que, pour les trois classes, les élèves qui construisent le mieux le concept sont systématiquement ceux qui produisent, en moyenne, le plus de coordinations R1-R2(e) en utilisant le plus d'indices R2(c), ces deux catégories étant celles qui sont au plus près de l'invariant.

Nous constatons, toujours pour les plus hauts niveaux de construction du concept, que le groupe « 24 rural » en construit beaucoup plus que les deux autres, et que le groupe « 972 » en construit plus que le groupe « 24 urbain » (+ 20% pour R2(c) et +35% pour R1-R2(e)).

Ces constats, pour les hauts niveaux de construction du concept, semblent être moins évidents avec les représentations R1(a). Ils sont toutefois confirmés pour le seul groupe « 24 rural » qui en construit plus que les deux autres (environ +37% par rapport à « 24 urbain » et +74% par rapport à « 972 »).

Tout ceci nous amène à la formulation de cette première hypothèse :

Hypothèse 1 : « Construire des représentations rationnelles R2 et R1-R2 au plus près de l'invariant favorise l'émergence du concept »

I-1-3 Pour aller plus loin

Nous avons voulu rechercher si les représentations R1 pouvaient avoir eu un impact sur les niveaux de construction du concept. Pour cela nous avons ciblé tous les élèves qui n'étaient parvenus à atteindre que les paliers de construction de l'invariant (I_2) et (I_3).

Liaison [I_2 - C_y]		R1			ÉLÈVE
3 corpus		a	b	Total	
I2	C3	8	6	14	B
I2	C3	7	6	13	J
I2	C3	7	5	12	H
		7,3	5,7	13	
I2	C2	2	1	3	K
I2	C2	4	1	5	M
I2	C2	6	5	11	J
I2	C2	7	5	12	I
I2	C2	13	2	15	P
I2	C2	7	2	9	N
I2	C2	5	3	8	K
		6,3	2,7	9	
I2	C1	6	4	10	L
I2	C1	3	2	5	M
I2	C1	7	2	9	O
I2	C1	3	3	6	C
		4,75	2,75	7,5	
TOTAL		90	47	137	
Moyenne/élève		6,4	3,3	9,7	

Liaison [I_3 - C_y]		R1			ÉLÈVE
3 corpus		a	b	Total	
I3	C3	5	3	8	E
I3	C3	8	3	11	F
I3	C3	6	2	8	E
		6,3	2,7	9	
I3	C2	5	2	7	E
I3	C2	3	5	8	G
I3	C2	5	2	7	J
I3	C2	5	3	8	G
		4,5	3	7,5	
I3	C1	5	3	8	K
I3	C1	4	4	8	H
		4,5	3,5	8	
TOTAL		46	27	73	
Moyenne/élève		5,1	3	8,1	

Nous constatons que, pour un même niveau de construction de l'invariant (I_2), les élèves qui atteignent le plus haut niveau de construction du concept (C_3) sont ceux qui ont produit, en moyenne, le plus de représentations R1(a) au plus près de l'invariant. Nous faisons le même constat pour les élèves qui ont atteint le niveau de construction de l'invariant (I_3).

Tout semble se passer comme si un *effet R1* bénéfique pouvait, en quelques sortes, « *accélérer* » le niveau de construction du concept. Ceci nous amène à rechercher si la réciprocité s'agissant des R1(a) se confirme quand on cible les niveaux intermédiaires de constructions du concept (C₂ et C₃).

Liaison [I _x -C ₂] 3 corpus		R1			ÉLÈVE
		a	b	Total	
I4	C2	6	4	10	C
I4	C2	5	2	7	B
I4	C2	6	2	8	F
I4	C2	4	3	7	J
		5,25	2,75	8	
I3	C2	5	2	7	E
I3	C2	3	5	8	G
I3	C2	5	2	7	J
I3	C2	5	3	8	G
		4,5	3	7,5	
I2	C2	4	1	5	M
I2	C2	6	5	11	J
I2	C2	7	5	12	I
I2	C2	13	2	15	P
I2	C2	7	2	9	N
I2	C2	5	3	8	K
		7	3	10	
TOTAL		81	41	122	
Moyenne/élève		5,8	2,9	8,7	

Liaison [I _x -C ₃] 3 corpus		R1			ÉLÈVE
		a	b	Total	
I4	C3	6	7	13	A
I4	C3	6	2	8	D
I4	C3	8	4	12	F
I4	C3	8	2	10	A
I4	C3	6	1	7	N
		6,8	3,2	10	
I3	C3	5	3	8	E
I3	C3	8	3	11	F
I3	C3	6	2	8	E
		6,3	2,7	9	
I2	C3	8	6	14	B
I2	C3	7	6	13	J
I2	C3	7	5	12	H
		7,3	5,3	13	
I1	C3	3	3	6	L
TOTAL		78	44	122	
Moyenne/élève		6,5	3,7	10,2	

Nous constatons (tableau de gauche) que pour le même niveau de construction du concept (C₂), les élèves qui partent du niveau de construction de l'invariant le plus bas (I₂), sont ceux qui ont produit le plus grand nombre de R1(a) en moyenne. À l'exception de l'élève (L) (tableau de droite), nous faisons le même constat pour les élèves qui atteignent le niveau (C₃).

Tout semble se passer comme si un *effet R1* bénéfique pouvait en quelque sorte « *compenser* » le retard dû au niveau de construction de l'invariant. Ce sont 25 élèves sur 44 qui sont concernés par ses remarques. Tout ceci nous amène à la formulation de cette seconde hypothèse :

Hypothèse 2 : « Construire des représentations images R1 favorise l'émergence du concept »

I-2 Les propositions didactiques pour améliorer le scénario pédagogique lié à la construction de l'élément chimique en seconde générale

Nous nous proposons maintenant de revenir sur le scénario pédagogique proposé aux élèves afin d'y apporter des améliorations à la lumière des résultats obtenus par les élèves.

I-2-1 La progression didactique

I-2-1-1 Quelle logique de progression choisir ?

Une des questions centrales est vraisemblablement de se demander si la structure de l'atome doit précéder l'avènement du concept d'élément. Cela peut surprendre d'imaginer « travailler »⁴ ce concept avant même de s'être occupé des couches profondes de l'atome. On peut aussi penser que le besoin de connaître la structure de la matière viendra de l'effet de surprise du phénomène de conservation lors d'une transformation. *Qu'est-ce qui se conserve ?* appelle la question suivante : *comment la matière est-elle organisée ?*

Nous n'imaginons pas trancher, ici, cette question de chronologie, mais la mettre en débat.

Si ce choix appartient aux enseignants, nous souhaitons donner notre sentiment. Il nous semblerait judicieux de n'approcher le tableau périodique des éléments de Mendeleïev qu'une fois la séance de

⁴ Faire expérimenter les élèves

travaux pratiques (T.P) réalisée par les élèves. La difficulté sémantique qui est au cœur de ce concept scientifique n'en serait que simplifiée tant le terme « cuivre »⁵ est au centre de la controverse. Comment, en outre, faire émerger un savoir (le concept d'élément chimique) si celui-ci a été abordé avant la séance de « découverte⁶ ». Là encore, nous pensons que ce T.P ne devrait pas être l'illustration d'un savoir préétabli⁷.

Dans la mesure où il nous apparaît indispensable de bien distinguer ce qui relève de la définition du concept d'élément chimique et de ce qui relève de sa caractérisation, l'expérimentation devrait s'imposer comme « première » pour aller chercher la définition avant de s'attaquer à la caractérisation. Force est de constater que la chronologie inverse l'emporte très majoritairement dans les progressions mises en place aux lycées aujourd'hui, réduisant la définition à une simple application du cours⁸ et faisant la part belle à la caractérisation, entretenant, au mieux, des imprécisions entre les deux, au pire, des confusions.: « *la boucle est belle et bien bouclée* ».

I-2-1-2 Analyse critique d'outils existants

Quatre scénarios (A-B-C-D) représentatifs « de ce qui se fait aujourd'hui en seconde générale » pour l'exemple de l'élément chimique « cuivre » sont ici présentés et soumis à une analyse critique. Nous distinguons deux familles de scénarios : des scénarios « classiques » sans démarche d'investigation (A et B) et des scénarios *a priori* conçus avec une démarche d'investigation (C et D). Voici quelques extraits de ces différentes propositions.

Scénario A (extraits⁹) /

TP N°6 :
CE QUI SE CONSERVE AU COURS
D'UNE TRANSFORMATION CHIMIQUE

Objectif :
 Nous allons tenter de résoudre cette énigme en effectuant une série de transformation impliquant le cuivre.

Matériels :

- Pour la sécurité : gants, lunettes et blouse.
- Pour les manipulations : Tubes à essais, spatule, pipette plastique, bec électrique.
- Produits : Tournure de cuivre, solution d'acide nitrique, solution de sulfate de cuivre II 0 à 0.1 mol/L, solution d'hydroxyde de sodium, mélange de carbone et d'oxyde de cuivre, eau de chaux.

VII. BILAN

- Qu'appelle-t-on réactif ? Qu'appelle-t-on produit ?
- Quels sont dans l'expérience 6 les réactifs ?

Compléter l'organigramme ci-dessous résumant les différentes transformations chimiques subit par l'élément cuivre (Préciser l'apparence des différents composés contenant l'élément cuivre).

```

graph TD
    Cu --> CuO
    Cu --> Cu2+
    CuO --> Cu2+
    Cu2+ --> Cu(OH)2
    Cu(OH)2 --> CuO
    
```

⁵ Dans l'hypothèse où la séance expérimentale serait centrée sur cet élément chimique

⁶ Séance par investigation

⁷ Il faudrait par ailleurs renouveler ce type d'expérimentations avec d'autres éléments pour parvenir à la généralisation.

⁸ C'est la position des programmes actuels en seconde générale

⁹ http://laroche.lycee.free.fr/barrandon/Seconde/TP01_cuivre.pdf (consulté le 07/05/2012)

Scénario B (extraits¹⁰)/

TP01 CONSERVATION DES ELEMENTS CHIMIQUES : L'ELEMENT CUIVRE

OBJECTIF : Mettre en évidence l'élément cuivre sous tous ses états lors de multiples transformations chimiques.

PARTIE I

I. ACTION DE L'ACIDE NITRIQUE SUR LE CUIVRE METAL : (TOURNURE DE CUIVRE)

Sous la hotte, verser 4 mL environ d'une solution d'acide nitrique dans un tube à essai contenant une tournure de métal cuivre.

Matériels

Produits (noms, formules, pictogrammes)

Annoter le schéma ci-contre :

Observation :

Conclusion :



Remarque :

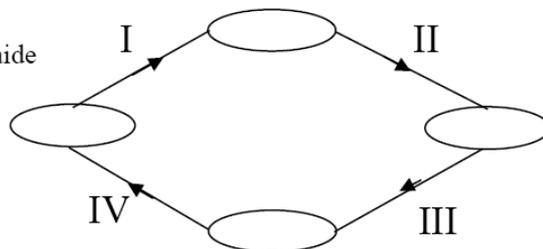
- Le gaz incolore formé (monoxyde d'azote NO) s'oxyde spontanément avec l'oxygène de l'air pour donner des vapeurs rouges : le dioxyde d'azote NO₂ : $2 \text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{NO}_2$
- La solution obtenue est encore très acide il faut la diluer avant de l'utiliser pour les expériences suivantes ou la remplacer par une solution déjà préparée. Soit S₁ cette solution

Questions relatives à l'expérience :

- Justifier l'expression tournure de cuivre.
- Quelle est la couleur de la plupart des métaux ? Le cuivre est une exception ; en connaissez-vous une autre ?
- Citer des utilisations du métal cuivre.
- Connaissez-vous d'autres « acides » ? Quelle est l'espèce chimique responsable de l'acidité ? Quelle est la grandeur qui mesure l'acidité ?

V Conclusion :

- Pouvez-vous compléter le diagramme suivant à l'aide de formule chimique :
1 pt



- Qu'est-ce qui se conserve au cours des différentes transformations ?

¹⁰ http://www.physagreg.fr/Cours2nd/Chimie/Theme2/TP/TP6-conservation_element_cuivre-prof.pdf (consulté le 07/05/2012)

Scénario C (extraits¹¹) /

Chimie 3 élément chimique	TP - Magic Copper - Élément chimique	Groupe : NOM : Prénom :
------------------------------	---	-------------------------------

Matériels utilisés :

- Copeaux de cuivre
- Tubes à essais
- Gants et lunette de protection
- Acide nitrique concentré
- Hydroxyde de sodium concentré (Soude) (NaOH)
- Solution d'ammoniaque
- Grenaille de zinc
- Hotte aspirante

I - Règles de sécurité

1. Dans ce TP, nous allons être en présence de gaz toxique. Rappeler les règles de sécurité.
2. Rappeler également les règles à suivre lors de l'utilisation de produits corrosifs (comme la soude ou les acides)

II - Magic Copper

1. Expériences

Après avoir mis de l'ordre dans ces fiches vous réaliserez les manipulations de David Copper pour prouver que son tour n'a rien de "magique". Vous rédigerez ci-dessous un compte-rendu détaillé de chacune des expériences que vous remettrez à l'Inspecteur des Fraudes.

- ❖ Dans votre compte rendu doit figurer un schéma (simple et au crayon à papier)
- ❖ Des observations pertinentes (j'observe un changement de couleur, un dégagement gazeux, la formation d'un précipité....)
- ❖ Une conclusion (Lorsque je J'observe que..... or donc)

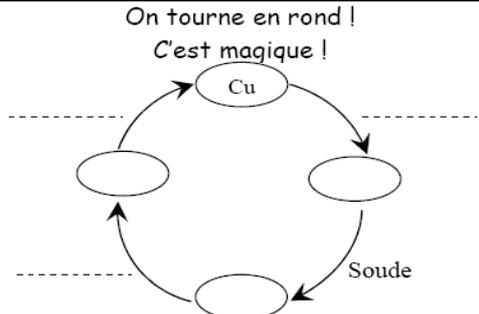


2. On tourne en rond
Recopier et compléter le cycle ci-contre

3. La conclusion du chimiste
En observant les diverses réactions chimiques que vous avez réalisées (voir fiche « On tourne en rond ! »), répondre aux questions suivantes :

- a) Quel élément se retrouve dans toutes ces réactions ?
- b) Est-il toujours sous la même forme ? Citer les différentes formes.
- c) Citer la loi de conservation des éléments.

On tourne en rond !
C'est magique !



¹¹<http://www.phylyco.fr/file/BEC%2020092010/DI/Chimie/Magic%20cooper/Activite%20element%20chimique%20cycle%20du%20cuivre.pdf> (consulté le 07/05/2012)

Scénario D (extraits¹²) /



Voici les informations recueillies par Tintin :

- L'élément cuivre est l'élément commun à toutes les espèces suivantes :

Nom de l'espèce chimique	Cuivre	Ion cuivre II	Oxyde cuivrique	Hydroxyde de cuivre II
Formule	Cu	Cu ²⁺	CuO	Cu(OH) ₂
Etat physique	Solide métallique	En solution	Solide	Solide
Couleur	Orangé	Bleu cyan	Noir	Bleu clair

- L'oxyde cuivrique donne des ions cuivre II et de l'eau en présence d'acide sulfurique (H⁺).
- La réaction entre le cuivre et l'acide nitrique produit des fumées rouges toxiques de dioxyde d'azote et des ions cuivre II.
- Par chauffage, l'hydroxyde de cuivre se déshydrate en oxyde cuivrique.
- Le cuivre s'oxyde à l'air par chauffage en donnant de l'oxyde cuivrique.
- Il se produit une réaction dite d'oxydoréduction entre les ions cuivre et le métal fer produisant du cuivre métal et des ions fer II : Fe²⁺.
- L'ion cuivre II réagit avec une solution de soude en donnant un précipité bleu d'hydroxyde de cuivre II.

Travail demandé :

Dans le rôle du professeur Tournesol, le professeur fera disparaître le cuivre.

Dans le rôle des deux policiers, vous devrez :

- E.1. : Élaborer et rédiger sur votre cahier de laboratoire un protocole expérimental permettant de faire réapparaître le cuivre en plusieurs étapes. Le présenter au professeur.
- E.2. : Réaliser la série d'expérience et faire réapparaître le cuivre.
- Q.3. : Rédiger un compte-rendu contenant les schémas légendés des expériences effectuées, les résultats obtenus ainsi que les équations des réactions chimiques réalisées.
- Q.4. : Expliquer au professeur Tournesol pourquoi le cuivre métallique a disparu. Donner l'équation de la réaction chimique.
- Q.5. : En conclusion, expliquer au capitaine Haddock pourquoi on a pu faire réapparaître le cuivre.

Tous ces scénarios ont comme base commune l'idée proposée par Viovy¹³ qui consiste à mettre en scène la re-formation du métal cuivre. Trois des scénarios (A-B et C), malheureusement, pré-représentent l'idée de cycle alors que le dernier (D- Q5) l'anticipe en annonçant la reformation du métal. Par ailleurs, les idées de conservation et de transformation apparaissent (titres A et B ; C dans « La conclusion du chimiste » ; D « L'élément cuivre est l'élément commun à toutes les espèces suivantes » noté au-dessus du tableau) sans que l'élève ait à les construire (les réinventer). Ces scénarios sont de types *structured inquiry*¹⁴.

Bien que demandant de rendre compte des observations (parfois très téléguidées), de les schématiser et de les interpréter (là encore les questions enclenchent le pilotage automatique), le cheminement des élèves est canalisé, banalisé pour ne pas qu'il « s'égare ». On est ici dans le paradoxe de croire que l'on

¹² <http://www.slampert.com/Documents%20seconde/TPC2.pdf> (consulté le 07/05/2012)

¹³ B.U.P (1979 et 1984)

¹⁴ Windschitl (2002) propose trois modèles pour l'investigation : « open inquiry » - « guided inquiry » et « structured inquiry »

ouvre les portes alors que la situation les referme d'elle-même. Les deux scénarios C et D censés proposer une démarche d'investigation, ne nous semblent pas y parvenir. La problématique qu'ils soulèvent explique dès le départ, que le métal réapparaît : (C / « ...élaborer un protocole permettant de faire réapparaître le cuivre » ; D / « ..l'illusionniste fait disparaître une pièce de 1 penny et réapparaître le cuivre dont elle est constituée »).

Alors que **cet évènement majeur** doit être le point d'orgue des expérimentations, il est ici, pris, comme un prérequis.

En résumé, les expérimentations sont données (il faut les réaliser pour retrouver ce qui doit se passer) la finalité est annoncée dans la problématique (qui est un défi dénaturé). Si l'on peut saluer l'idée de faire appel aux représentations, celles-ci ne sont pas réinvesties.

Enfin s'agissant de l'essentiel sur le fond, à aucun moment l'élève n'est confronté cette prise de conscience par lui-même, de l'émergence de l'invariant, de la construction de la conservation par transformation.

En relisant certaines phrases de ces scénarios, on peut légitimement se demander quels peuvent être leurs intérêts de fond dans le projet de construire ce concept scientifique.

« *L'élément cuivre est l'élément commun à toutes les espèces suivantes* »

« *Citer la loi de conservation des éléments* »

« *Qu'est-ce qui se conserve au cours des différentes transformations ?* »

Titres / « *Ce qui se conserve au cours d'une transformation chimique* » - « *Conservation des éléments chimiques : L'élément cuivre* »

Il nous semble assez évident que ces différentes propositions ne s'inscrivent pas dans une logique de découverte du concept scientifique. Nous faisons l'hypothèse que ces quatre propositions sont chronologiquement postérieures à l'étude du tableau périodique des éléments. Ces différentes lectures confirment deux choses très importantes :

- Elles ne permettent pas d'illustrer une démarche d'investigation dans la mesure où les élèves ne découvrent pas le concept d'élément chimique.
- Elles ne mettent pas en scène l'émergence de l'invariant, au contraire, elles le banalisent et ne donnent pas à l'élève la possibilité de le construire au fur et à mesure.

En résumé, les deux protocoles C et D sont à contre-courant et du fond (invariant et concept non-construits par l'élève) et de la forme (investigation peu probante) ; si les protocoles A et B semblent plus en accord avec ce qui pourrait être tenté, l'affichage de ce qui est à découvrir dès le départ (donné dans les titres) et la mise en forme beaucoup trop inductrice des organigrammes (à la fin) nous laissent sur notre faim.

Tout se passe comme si, une fois abordée, la caractérisation du concept, celle-ci avait pris le dessus sur la définition, laquelle, dans un cadre expérimental, s'affiche comme secondaire et comme une application de la caractérisation.

I-2-2 Comment valoriser l'invariant et rendre plus lisible le concept¹⁵ ?

Il semble que pour ce T.P, afficher un titre puisse ne pas être l'idée à retenir. Au contraire, il nous semble intéressant de laisser l'opportunité aux élèves d'en imaginer les attributs. Valoriser l'invariant passe vraisemblablement par un scénario mettant en scène une double redondance. La première, volontairement visible, consiste à partir d'une espèce chimique pour y « revenir » *in fine* : on construit l'idée de *cycle* qui peut induire l'idée de continuité de présence constitutive de l'invariant. On peut également proposer un test systématique, comme le test de flamme, pour appuyer cette première idée : « *quelque chose est toujours là* ». La seconde consiste à faire émerger la récurrence symbolique et/ou sémantique dans les différentes formes des espèces mises en jeu : on construit l'idée de conservation lors des différentes transformations. Ici le rôle des données servies aux élèves est primordial ; celles-ci peuvent être collationnées dans un tableau¹⁶ sans indications particulières sur « *ce qui s'est passé* » mais uniquement en mettant en lumière des informations qui vont aider aux identifications indispensables des différentes espèces mises en jeu lors des transformations.

¹⁵ Fleury (2013)

¹⁶ Cf. *supra* Chap I (I-3-1) – l'identification des espèces mises en jeu est une étape particulièrement importante.

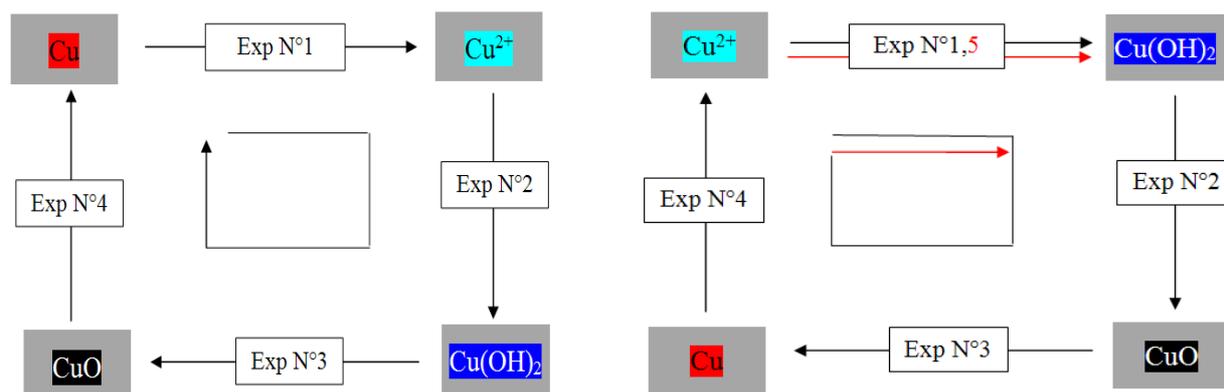
En outre, valoriser les représentations des élèves en leur donnant de l'espace (aux sens propre et figuré) pour qu'ils puissent s'exprimer est, nous le pensons, source de lisibilité dans la construction du concept d'élément chimique. Par ailleurs, nous pensons que débiter par cette série d'expériences pourrait être une excellente entrée. En effet, le cours suivant pourrait être organisé à partir des différentes idées des élèves en mettant plus particulièrement en scène leurs désaccords sur la présence du « cuivre ». Le débat qui en découlerait, pourrait alors mettre en évidence que le mot « cuivre » doit être utilisé à bon escient. Certains diront : « *le cuivre a disparu et a été reformé* » en pensant au métal cuivre quand d'autres avanceront que « *le cuivre était présent tout le temps* » en touchant du doigt l'élément cuivre. **Nous mettons ici en lumière la richesse et l'objectif principal de la situation.**

L'enseignant doit parvenir à convaincre que tout le monde peut avoir raison, pour peu que l'on précise « de qui l'on parle ». À ce sujet les différents scénarios ne font pas toujours de cet aspect lexical (*polysémie* du mot « cuivre ») un enjeu essentiel. Le mot « cuivre » est parfois maladroitement utilisé pour désigner alternativement le métal cuivre ou l'élément cuivre :

Dans le scénario C, nous pouvons successivement lire : « ...Tintin a recueilli toutes les informations concernant le cuivre... » - « La réaction entre le cuivre et l'acide nitrique » ; « ...le professeur Tournesol a fait disparaître le cuivre métallique.. »).

Nous suggérons d'aborder le concept d'élément chimique avec l'objectif de faire émerger cette polysémie et de rechercher par la suite « ce qui peut bien se conserver » lors d'une transformation, en allant faire de l'investigation vers les couches profondes de la matière. L'approche structurale et le tableau périodique seraient alors abordés avec un autre regard.

Quel protocole choisir ? (à gauche celui utilisé pour la recherche, à droite celui suggéré désormais)



Le scénario proposé est structuré (*structured inquiry*) alors que l'enseignant est dans une logique d'action conjointe (Sensevy 2011). Le protocole (2) que nous suggérons présente cinq adaptations principales avec celui utilisé lors de cette recherche.

- La première consiste à faire « *un peu plus d'un cycle complet* ». En effet, comment parler de cycle (caractérisé par une périodicité) sans être en mesure de l'observer concrètement ? Il n'est pas très aisé d'attendre que les élèves observent un cycle si la situation ne permet pas d'observer une structure qui le contient et donc le singularise. Ainsi, ce sont cinq expériences et non plus quatre qui pourraient être menées lors de la séance expérimentale. L'expérience 5 permet ainsi de comprendre qu'un second cycle vient d'être enclenché¹⁷.
- La seconde, plus technique, consiste à décaler le cycle, en partant de l'espèce ionique (Cu²⁺). Nous avons observé de nombreux obstacles¹⁸ liés à la première expérience du protocole (1) et il nous apparaît plus simple d'éviter de commencer par ce qui a été ressenti comme étant le plus délicat. Non pas qu'il faille mettre ainsi de côté la valorisation de l'erreur, mais plutôt pour limiter les fausses pistes qui se sont révélées préjudiciables par la suite.

¹⁷ Khanfour-Armalé et Le Maréchal (2008) proposent au contraire de limiter les transformations à deux uniquement. Ils proposent de travailler à partir d'une analogie (les « blicks ») p133

¹⁸ Comme la sublimation du métal qui serait moins présente avec le second cycle car la quantité de matière formée en métal cuivre serait alors beaucoup plus faible.

- Martinand et Viovy (1979 p880) proposent d'utiliser des « tests chimiques à chaque étape d'une chaîne de réactions et donnant des résultats identiques ». Ceci suppose que l'élève ait au préalable éprouvé ce test et en ait compris la portée. Viovy (1984 p909) précise la nature des tests en suggérant d'avoir recours au test de flamme : « L'élément cuivre donne une couleur bleu-vert à la flamme et peut être testé dans toutes les substances chimiques rencontrées dans le cycle ». On utilisera de préférence un fil de platine ou à défaut un fil de nickel-chrome (et en dernier recours un petit clou en fer).

- S'agissant des supports distribués aux élèves, l'accent peut se porter sur l'identification des différentes espèces de manière plus explicite. Ainsi la question récurrente suivante peut-être posée à la fin de chaque expérience afin d'inviter à utiliser au mieux les données du tableau : « Quelles sont les espèces chimiques mises en jeu dans cette expérience ? ». Cela peut favoriser l'exploitation des écritures des espèces chimiques et faire émerger la continuité de la présence de l'élément cuivre par le symbole « Cu ».

- S'agissant du scénario lui-même, qu'il est envisageable de mettre en œuvre dans la classe, nous invitons les collègues à initier la séance par une situation défi qui pourrait être formulée ainsi : « *Aujourd'hui je vous mets au défi de pouvoir trouver la définition d'un des concepts scientifiques les plus importants de la chimie moderne* ». Les élèves travaillent en double-binôme¹¹ et réalisent deux expériences consécutives du cycle. Chaque groupe vient présenter ses observations et interprétations d'une expérience sur un document débattu où sont consignées leurs représentations. Le travail collectif est alors conditionné par l'apport de chaque groupe, ce qui stimule l'attention et assure la mobilisation de tous les élèves.

L'enseignant, lors de ces différentes mutualisations, valorise, l'émergence de l'invariant, les écritures chimiques des différentes espèces rencontrées et organise les débats autour du mot « cuivre ». **La polysémie de ce mot est un enjeu majeur du protocole** : le « cuivre » disparaît-il ou est-il toujours présent ? Les élèves doivent comprendre que les différentes formes de l'espèce cuivre se transforment alors que l'élément cuivre se conserve.

Cette proposition est, bien entendu, en débat. Elle a juste le mérite d'exister et de prendre en considération les analyses de notre recherche : créer de espaces d'expressions individuelles et collectives afin de valoriser l'apport des représentations tout en les utilisant comme tremplin pour l'émergence de l'invariant afin de donner de la lisibilité au concept lui-même.

Après avoir détaillé les résultats obtenus sur le concept d'élément chimique, et porté des suggestions concrètes et opérationnelles pour les enseignants, nous nous interrogeons, dans cette dernière partie, sur la manière de classer les concepts scientifiques.

II- Catégorisation concept/invariant

Nous ne sommes pas convaincus par les différentes classifications¹⁹ des concepts scientifiques proposés aujourd'hui par le monde de la recherche. Certaines classifications semblent faillibles, d'autres ne prennent pas toujours la dimension spécifique de certaines disciplines. Nous concluons le *chapitre IV* sur cette incertitude de devoir classer les concepts pour mieux identifier ce qui les singularise.

Sans en faire le *neurone pontifical* rejeté par Varela, la *pièce angulaire* de tout concept scientifique, nous tentons, ici, d'avancer l'idée selon laquelle l'invariant pourrait s'imposer comme un conseiller spécial, très spécial !! Intimité d'une liaison entre ombre et lumière, entre invariant et concept, nous avons le sentiment, parfois jusqu'à la conviction, qu'il peut se jouer une partie à deux, un tango dans lequel chacun tire parti de l'autre. Mais qui mène la danse ?

Notre hypothèse immédiate peut être exprimée ainsi :

Hypothèse : « Pour obtenir une classification des concepts il est utile de se fonder sur une catégorisation des invariants ».

¹⁹ Cf. *Chap IV (I)*

II-1 Vers une catégorisation des invariants

Le domaine des sciences physiques est criblé de concepts, tous plus différents les uns des autres. Cela vient en premier lieu du foisonnement des *sous-disciplines* (mécanique relativiste, électronique, physique nucléaire, chimie minérale en passant par l'optique ondulatoire, ou la chimie organique). Une conséquence prévisible est l'interconnexion qui existe entre ces différentes *sous-disciplines* ; comment imaginer aborder le concept de *désactivation* pour un échantillon radioactif, sans se référer au concept d'élément chimique venant de la chimie minérale ? Une autre conséquence tout aussi prévisible est la « proximité » interdisciplinaire. Ainsi, il ne faudra pas s'étonner de l'existence de concepts *bicéphales* qui lieraient sciences physiques et sciences de la vie et de la Terre²⁰ ou sciences physiques et médecine²¹.

Si l'on peut catégoriser en première lecture les concepts en *scientifiques, sociaux, nomades* voire *pirates*²², ne peut-on pas tenter de catégoriser les invariants, ceux qui renvoient aux différents concepts scientifiques, et qui nous intéressent plus particulièrement. Nous engageons ici un exercice en sciences physiques dont, la portée reste à *prouver*, l'intérêt est à *éprouver*, et l'idée-même demande à être *approuver* voire *désapprouver*.

Sur le champ des mathématiques, Vergnaud (1991) propose de catégoriser les invariants *opérateurs* selon trois types logiques, en les qualifiant de « propositions », « fonction propositionnelle » et « argument »²³. Il leur confère une place centrale dans la conceptualisation allant jusqu'à dire : « Concepts et schèmes explicites ne forment que la partie visible de l'iceberg de la conceptualisation : sans la partie cachée formée par les invariants opératoires, **cette partie visible ne serait rien** ». *Difficile de trouver meilleur allié !!*

Nous tentons maintenant de mettre à jour une catégorisation principalement centrée sur les sciences physiques, en l'illustrant par quelques exemples significatifs.

Au fil de nos investigations, de nos expérimentations sur le terrain ces dernières années, nous avons sillonné quelques concepts scientifiques de l'école maternelle aux instituts de formation en I.U.F.M. Avant de rendre compte de ses diverses explorations (au chapitre suivant) et de ce qu'elles peuvent apporter à ce débat, nous proposons d'identifier plusieurs catégories d'invariants : les voici.

II-1-1 Les invariants par collection

Ces invariants sont *a priori* les plus simples à appréhender. Ils s'identifient à partir d'un ou plusieurs « attributs » qui sont partagés par une série d'objets, laquelle représente alors une *collection*.

- Attardons-nous tout d'abord sur le concept de *planète*. L'U.A.I (Union Astronomique Internationale) s'est longuement penchée sur la définition des planètes lors de sa 26e assemblée générale, qui s'est tenue à Prague du 14 mai au 25 août 2006, reléguant à cette occasion *Pluton* au rang des *planètes naines*. Ce nouveau concept qui porte les quatre attributs (invariants) ci-dessous a nécessité de redéfinir ceux du concept de *planète*²⁴ :

[- Est en orbite autour du Soleil.

- A une masse suffisante pour que sa gravité l'emporte sur les forces de cohésion du corps solide et le maintienne en équilibre hydrostatique, sous une forme presque sphérique.

- N'a pas éliminé tout corps susceptible de se déplacer au voisinage de son orbite.

- N'est pas un satellite.]

Ainsi à partir de ces deux concepts, auxquels il faudrait ajouter les concepts de *petits corps* et de *satellites*, redéfinis par la même occasion par l'U.A.I, il nous est possible d'identifier l'ensemble des objets qui gravitent autour de notre étoile.

- Penchons-nous maintenant sur le concept de *vecteur*. Il nous faut préciser tout d'abord ce que nous entendons par « vecteur ». Un vecteur *lié* possède quatre caractéristiques : son origine, sa droite

²⁰ C'est le cas du concept de thermorégulation Cf. *infra* Chap I (I-1)

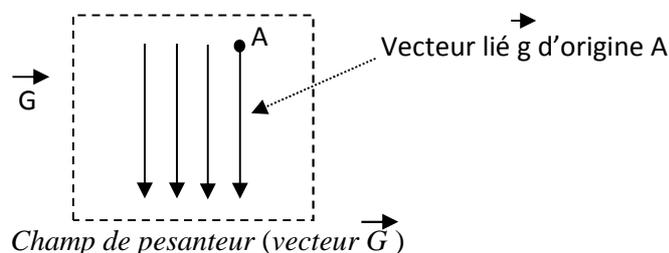
²¹ C'est le cas du concept de diagnostic en médecine générale

²² Cf. *supra* Chap IV (III-2)

²³ Vergnaud (1991) pp142-144 : propos tenus sur les indices qui composent un schème

²⁴ Le concept de *planète* possède les deux premiers attributs du concept de *planète naine* et comme troisième le suivant : « A éliminé tout corps susceptible de se déplacer au voisinage de son orbite ».

d'action (ou direction), son sens, et sa norme (ou sa valeur). Un vecteur *libre*, lui, ne possède que les trois dernières. Ainsi, le vecteur *lié* doit être considéré comme un des représentants, un cas particulier, du vecteur *libre* (lequel est aussi appelé par simplification *vecteur*). On appellera donc *vecteur*, l'ensemble des vecteurs *liés* qui ont tous trois attributs communs (les invariants : direction, sens et norme). Le physicien, pour expliquer ce qui se passe, utilise souvent un vecteur *lié* avec une origine particulière pour « représenter » la situation qu'il étudie. Le *vecteur* est bel est bien un concept qui concerne la physique, concept auquel est associé un système d'invariant *par collection* (trois au total). Ce concept représente ce que le physicien nomme « un champ », comme le champ de pesanteur.



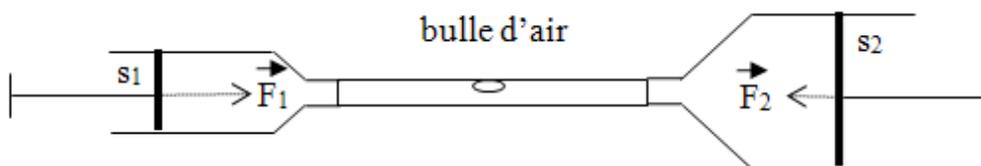
Si les domaines²⁵ scientifiques n'échappent pas aux invariants *par collection*, ce ne sont pas ces invariants-là qui caractérisent le mieux la spécificité des concepts des sciences physiques²⁶.

Les deux invariants qui suivent sont de nature à mieux rendre compte de cette spécificité, laquelle peut aider à singulariser les concepts de cette discipline.

II-1-2 Les invariants *par équilibre*

Ces invariants sont peut-être, de prime abord, les plus « lisibles », car implicitement liés à des signifiants mathématiques qui « rassurent ». L'équilibre invite à concevoir un système qui est régi par une logique de compensation réciproque et simultanée. On pourrait illustrer cette idée en citant la troisième loi de Newton (1687): « Tout corps A exerçant une force sur un corps B subit une force d'intensité égale, de même direction mais de sens opposé, exercée par le corps B ». Parmi les concepts susceptibles d'être adossés à un invariant *par équilibre*, on peut citer sans ordre défini, pour les sciences physiques, les concepts de *force*, de *pression*, de *moment d'une force*. Nous aborderons ici les deux derniers.

- Abordons le concept de *pression* qui est un concept lié à un invariant *par équilibre*. La *pression* (p) est égale au quotient de la force (F) exercée perpendiculairement à un élément de surface (s) par la grandeur de celui-ci (d'où l'expression $p = F/s$). Prenons un petit tube rempli d'eau relié à deux seringues de sections différentes (s_1 et s_2); pour maintenir la bulle d'air au même endroit, il faudra exercer des forces d'intensité différentes (F_1 et F_2) sur les pistons de telle sorte que : $p_1 = p_2$ et donc que $F_1/s_1 = F_2/s_2$



Dans le même ordre d'idée, si deux randonneurs en montagne exercent des forces d'intensité F_1 et F_2 sur le même manteau neigeux avec des raquettes de surfaces s_1 et s_2 , leur enfoncement sera identique si et seulement si $p_1 = p_2 = F_1/s_1 = F_2/s_2$.

²⁵ Les différents ordres de la classification phylogénétique du vivant en sciences de la vie et de la terre sont liés à un système d'invariants *par collection* (pour le concept d'*insecte*, l'invariant est : « 6 pattes »).

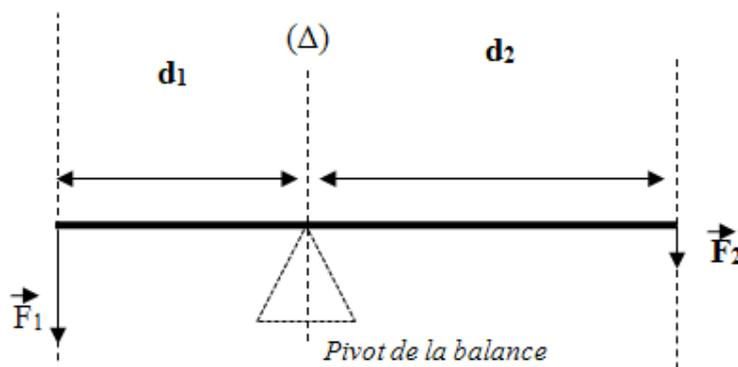
²⁶ Même si le concept de vecteur est une exception.

Un travail spécifique sur le concept de pression a été entrepris en classe de seconde générale sur une cohorte de 32 élèves. Il s'agissait de rechercher des indices de présence de l'invariant par *équilibre* au sein des représentations des élèves. L'exploration en cours a permis d'observer des tentatives d'utilisation de signifiants approchant l'expression mathématique chez la majorité des sujets (67%). Nous reviendrons²⁷ sur la portée de cette étude et, entre autres, sur les formes identifiables de l'invariant dans les représentations des élèves.

-Portons notre intérêt sur le concept de *moment d'une force*²⁸ (M) exercée sur un système muni d'un axe de rotation (noté (Δ)) ; (M) est égal au produit entre l'intensité de la force (F) exercée sur le système et la plus petite distance (d) qui sépare la droite d'action de la force et sa parallèle, passant par l'axe de rotation (d'où : $M = F \cdot d$). Pour maintenir en équilibre un objet, muni d'un axe de rotation, il faut que l'ensemble des moments (M) des forces qui s'exercent sur cet objet, par rapport à l'axe de rotation, « se compensent ». Cela peut s'énoncer en disant que la somme des moments des forces exercées sur l'objet doit être nulle.

Prenons le cas d'une balance « romaine ». L'équilibre de la balance sera obtenu, si le moment M_1 du « contrepoids » est compensé exactement par le moment M_2 de l'objet que l'on souhaite acquérir. Ici l'invariant à repérer pour ce concept est l'égalité suivante :

$F_1 \cdot d_1 = F_2 \cdot d_2$ ce qui s'écrit aussi $M_1 + M_2 = 0$ ²⁹.



Les deux invariants associés aux concepts précédents permettent de résumer l'équilibre atteint à l'aide d'une égalité mathématique simple. Cela est aussi le cas pour les concepts d'*équivalence* en chimie minérale et de *réfraction* en optique géométrique.

Concept	Symbole	Expression de l'équilibre
Moment d'une force	(M)	$F_1 \cdot d_1 = F_2 \cdot d_2$
Pression	(p)	$F_1/S_1 = F_2/S_2$
Équivalence	(n)	$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2$
Réfraction	(-)	$n_1 \cdot \sin(\alpha) = n_2 \cdot \sin(\beta)$

II-1-3 Les invariants par conservation-transformation

Ces invariants sont vraisemblablement les plus paradoxalement délicats à appréhender. En effet, pour cette catégorie, concept et invariant sont, à s'y méprendre, confondants. Cette proximité devrait *a priori* rendre plus lisible encore le concept. En définitive, ce lien très étroit de parenté entre le concept et son invariant peut troubler la lecture de leur liaison.

²⁷ Cf. *infra* Chap IX (II)

²⁸ On peut aussi utiliser la définition du moment d'une force à partir d'un produit vectoriel, mais elle est mathématiquement plus compliquée: $M(F)_{/\Delta} = \vec{F} \wedge \vec{AB}$; par ailleurs, nous ne nous intéressons qu'aux actions qui influencent l'équilibre.

²⁹ En choisissant un sens positif de rotation pour la balance, l'un des deux moments est alors négatif ce qui explique qu'à partir de la relation $M_1 + M_2 = 0$, on obtienne la relation $F_1 \cdot d_1 = F_2 \cdot d_2$

L'invariant rend lisible un concept pour lequel il y a *conservation lors d'une transformation* (pour ne pas dire *conservation malgré la transformation*).

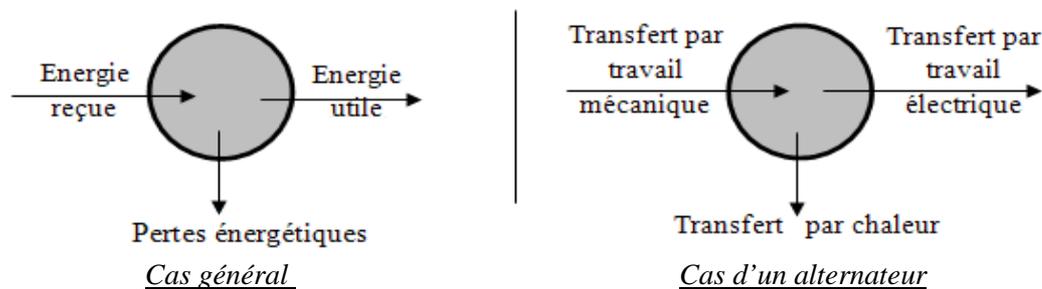
On s'attardera plus particulièrement ici sur les concepts d'*énergie* et d'*élément chimique*.

-S'agissant du concept d'*énergie*, il se traduit par une idée simple qui sous-tend qu'un système « conserve son énergie malgré ses diverses transformations ».

Le mot transformation renvoie à des variations de formes voire de fonds, ce qui est naturellement contraire à l'idée de conservation. Quand on coupe du bois pour le brûler dans une cheminée, l'observation de la cendre dans le foyer ne guide pas vers l'évidence de l'idée de conservation, mais au contraire vers une hypothèse de perte voire de disparition.

Avant de parler de concept d'énergie, encore faut-il avoir perçu l'idée de sa présence et plus encore de sa continuité de présence au cours d'une transformation. Ces transformations s'effectuent dans des « convertisseurs » comme notre voiture ou notre propre corps. C'est l'invariant qui rend lisible cette double idée (présence et continuité). Le concept, lui, porte la conservation lors des transformations. Comment imaginer parler de conservation tant que l'on n'a pas saisi que, ce que reçoit, ce qui n'est pas converti, ou ce qui l'est, au sein d'un convertisseur, reste, demeure de l'énergie ?

● Symbole d'un convertisseur



Les échanges énergétiques au sein d'un convertisseur (ci-dessus avec l'exemple du convertisseur alternateur au sein duquel l'énergie se conserve malgré ses transformations) se traduisent par la loi de conservation de l'énergie. Un système qui échange de la chaleur ΔQ avec le milieu extérieur a une énergie interne ΔU qui se conserve (ΔE_m : variation de l'énergie mécanique du convertisseur), ce qui se traduit par la relation suivante pour un même système pris à deux moments distincts [$\Delta U_1 = \Delta E_{m1} + \Delta Q_1 = \Delta E_{m2} + \Delta Q_2 = \Delta U_2$]. Feynman (1999) propose d'aborder de manière intuitive la conservation de l'énergie en nous relatant les aventures d'un enfant jouant avec des cubes. Cet enfant possède 28 cubes indestructibles et identiques. Il joue pendant plusieurs jours dans sa chambre et, quand il a fini en retrouve, ou 27 avant de trouver le dernier sous un tapis, ou 26 avant de trouver les deux autres dans son jardin, ou 30 avant de se souvenir qu'un ami était venu jouer avec lui. L'énergie, c'est bien ce qui se conserve malgré nous. Ceci amène Feynman à dire : « C'est une certaine quantité qui s'appelle énergie qui ne change pas dans les multiples modifications que peut subir la nature »³⁰. Quand on brûle du bois dans sa cheminée, il y a des cubes qui sont « partis ailleurs », mais leur nombre n'a pas varié.

-Nous terminons avec le concept d'*élément chimique*. Ce concept a été étudié dans la première partie. Nous avons vu que son invariant répondait à l'idée de continuité de présence, ce qui se traduisait par la conservation de « quelque chose » malgré les différentes transformations. Il apparaît comme une évidence que l'invariant associé à ce concept soit de type *conservation-transformation*. Sur l'exemple de l'élément cuivre, au fur et à mesure des expériences réalisées et décrites précédemment, on obtient des espèces chimiques aussi diverses que des ions (Cu^{2+}) des solides ($\text{Cu}(\text{OH})_2 - \text{CuO}$ et Cu) qui attestent des transformations subies alors que « l'élément cuivre », lui, se conserve bel et bien.

³⁰ Feynman (1999) p 42

Nous proposons ainsi, à ce stade de nos réflexions, trois catégories possibles des invariants pour des concepts relevant des sciences physiques mais pouvant peut-être convenir à d'autres champs disciplinaires.

La dernière catégorie d'invariant qui est suggérée ici est à mettre en relation avec le domaine des sciences de la vie et de la Terre. La dénomination de cette catégorie est motivée par la proposition de Prochiantz (2008, p44) qui, tentant de définir la pensée d'un point de vue biologique, avance que : « La pensée est le rapport adaptatif entre le vivant et son milieu ».

II-1-4 Les invariants par adaptation

Parmi les concepts scientifiques auxquels il serait possible d'attribuer un invariant par adaptation, citons les concepts de *migration* et de *mimétisme*.

-S'agissant du concept de *migration*, on citera pour l'illustrer : le gnou, le monarque, la « palombe », les crapauds communs, ou plus spectaculaire, les crabes rouges de Christmas Island en Australie. Un des invariants est le déplacement géographique qui peut être motivé par les besoins de la reproduction ou la recherche de nourriture. Un autre invariant réside dans le caractère de déplacement « de masse ». Le troisième réside dans la récurrence de la période de déplacement, souvent liée aux conditions et aux évolutions climatiques.

-S'agissant du concept de *mimétisme*³¹, on pense au caméléon, à la seiche, au phasme, mais aussi aux plantes-cailloux : les lithos, ou aux orchidées et au papillon-chouette. Tous ces organismes vivants « jouent » avec les invariants. Ceux-ci sont au nombre de trois : il y a le modèle, le mime (celui qui imite le modèle), et le dupe (celui qui est trompé par le mime). Les tromperies sont basées sur l'usurpation d'une apparence ou d'un comportement. Ces attitudes comportementales peuvent être très spécifiques, comme pour « les associations d'introuvables »³² (une proie affiche des couleurs vives et les fait disparaître au repos – le prédateur finit par associer ces couleurs à une absence de proie) ou avec la « coloration éclair » (une proie affiche des couleurs vives en s'échappant créant un effet de surprise chez le prédateur). On notera, parmi les invariants de ce concept, qu'il existe toujours un objectif chez l'organisme qui utilise le *mimétisme* : se cacher pour survivre ou se nourrir, effrayer, voire se reproduire comme pour les orchidées qui produisent des phéromones d'insectes.

Qu'il nous soit permis ici d'émettre l'hypothèse que le concept de *cycle de vie* puisse être associé à un invariant (le gène) *par conservation-transformation*. Reste aux collègues de notre discipline voisine à en accepter l'idée ou à la réfuter pour porter à ce concept un invariant plus en adéquation avec celui-ci.

Comme nous l'avons évoqué, certains concepts se situent aux frontières de deux disciplines. Nous engageons maintenant une réflexion sur un concept *frontalier*, le concept de *thermorégulation*³³, qui fait appel à deux disciplines distinctes que sont les sciences physiques et les sciences de la vie et de la Terre.

II-1-5 Le cas particulier du concept de thermorégulation

Un jour (été 1999), Jacques Lhonoré³⁴, parlant des attitudes singulières des papillons et relatant ses observations sur ceux qu'il appelait les « individus-pionniers » me dit à l'occasion d'échanges que nous avions aux tourbières de Venduire³⁵ (lesquelles abritent quelques colonies exceptionnelles de *Maculinea telejus*³⁶) : « Pierre, il existe des imagos³⁷ prospecteurs, ils ont des comportements

³¹ Berthier (2003) p26 : Les mimétismes peuvent, soit permettre d'assurer une protection à une proie, soit conférer un avantage à un prédateur.

³² Berthier (2000) p34

³³ Cf. *supra* Chap I (III)

³⁴ J.Lhonoré : Entomologiste reconnu, entre autres, pour ces travaux sur les liaisons *fourmis-papillons*

³⁵ Commune située en Dordogne au Nord-Ouest du département

³⁶ Nom latin d'une espèce de papillon protégé dont le cycle de vie passe par la présence bienveillante d'une fourmi ce qui lui confère toute sa fragilité et justifie sa protection

³⁷ Forme adulte d'un cycle de vie (ici le papillon qui vole)

reconnaissables par leurs vols horizontaux, ils cherchent vraiment à découvrir un ailleurs..... »³⁸. Je l'ai écouté, médusé, sans réaction, tant son interprétation m'est apparue simple et évidente, mais peut-être aussi car je voyais des « papillons-navigateurs » à travers Cartier ou Magellan, et qu'il venait une fois de plus de confirmer les parallèles entre espèces vivantes.

Cette anecdote montre s'il en est besoin, que le monde qui nous entoure n'est pas figé, au contraire, il doit en partie sa spécificité à des phénomènes d'adaptations.

L'adaptation se joue du temps. Dans un laps de temps très court, on parlera d'improvisation, d'instinct, pour des durées plus longues, d'évolution, de civilisation.

Il se pourrait bien que deux sortes d'adaptations puissent être distinguées en fonction de la qualité de la fenêtre d'observation que l'on se donne.

Le concept de *thermorégulation* s'identifie en le décortiquant sémantiquement : « *Thermo-* » qui signifie - chaleur - en grec, renvoie au concept d'*énergie* pour lequel nous avons déjà débattu des contours de son invariant *par transformation-conservation* ; « *-régulation* » est un terme qui se définit par l'idée de devoir maintenir un état stable, de maintenir constante une *fonction* en utilisant un ensemble de techniques. Cela fait référence au concept d'*autorégulation* et nous renvoie à Varela et ce qu'il développe avec les systèmes autopoïétiques.

Dans le règne animal, les *fonctions* vitales d'un organisme sont maintenues, entre autres, grâce à une température corporelle (« thermo ») qui est régulée (« -régulation ») par des attitudes comportementales qui peuvent être très singulières, comme la position « fœtale » chez les mammifères, l'agitation de ses oreilles chez l'éléphant. Dans le chapitre suivant, nous relaterons une expérimentation menée avec une cohorte de professeurs stagiaires en sciences physiques sur ce concept de thermorégulation.

Si l'on s'accorde sur l'idée selon laquelle la thermorégulation est un concept scientifique, alors nous pouvons tenter d'avancer que celui-ci est assujéti à deux invariants, l'un *par conservation-transformation* et l'autre *par adaptation*³⁹.

Nous pourrions également élargir le champ de la thermorégulation au concept de *survie* ou à celui de *vivant*. Mais nous laissons le soin aux collègues spécialistes de mener cette réflexion qui dépasse notre sphère de compétence.

III- Vers une recherche pluridisciplinaire liée aux invariants

Nous venons de proposer de catégoriser les invariants afin d'aider à mieux comprendre les spécificités des concepts scientifiques. Nous rappelons les quatre formes d'invariants repérés.

<i>Par collection</i>	<i>Par conservation-transformation</i>	<i>Par équilibre</i>	<i>Par adaptation</i>
-----------------------	--	----------------------	-----------------------

Quelles suggestions pour la formation des maîtres pourrait-on retenir de cette initiative ?

Il nous semble que le monde des concepts est un monde difficile pour toutes celles et tous ceux qui le découvrent. L'abstraction qui en découle est un obstacle pour se saisir de ce qui se cache derrière chacun d'entre eux.

C'est la raison pour laquelle nous croyons aux invariants. Nous pensons qu'ils peuvent aider à mieux comprendre les concepts.

Il nous est apparu que si les concepts scientifiques avaient besoin de leurs invariants pour gagner en lisibilité, peut-être que les autres disciplines sont aussi confrontées à ce problème. Pourquoi alors, exclure l'idée de rentrer dans une recherche de « ses » propres invariants ? Et si certains s'affirmaient comme des objets communs⁴⁰ ?

³⁸ Conversation aux tourbières de Vendoire (Dordogne) mai 2000

³⁹ Prochiantz (2008) « la pensée est le rapport adaptatif entre le vivant et son milieu »

⁴⁰ Des P.G.C.D (Plus grands communs diviseurs).

Discipline	Concept	Invariant(s) par....
Sciences de la vie et de la Terre	<i>Vivant</i> <i>adaptation ?</i>
Mathématiques	<i>Proportionnalité</i> <i>équilibre ?</i>
Géographie	<i>Paysage</i> <i>collection ?</i>
Histoire	<i>Révolution</i> <i>conservation-transformation ?</i>
Médecine	<i>Diagnostic</i> ?
Education musicale	<i>Consonance</i>	

Nous avons, au chapitre IV, pour quelques concepts venant de différentes disciplines, tenté de repérer quelques invariants, sans les soumettre à notre catégorisation.

Nous appelons de nos vœux chaque discipline à « penser » ses invariants, et à nous rejoindre dans cette initiative de classification.

La nôtre est à l'état de prototype et nous espérons pouvoir la confronter aux idées de nos confrères et bien au-delà de la communauté scientifique, avec peut-être, en toile de fond, des perspectives didactiques au sein des organismes de formation des maîtres.

L'invariant peut-il devenir un véritable enjeu de formation ? Peut-il concilier des disciplines, être un centre d'intérêt commun ?

Dans le chapitre qui suit, le dernier, nous nous autorisons une petite digression en allant interroger d'autres invariants liés à d'autres concepts. Ainsi nous investirons les concepts d'*ombre*, de *pression* et de *thermorégulation* en présentant nos premiers résultats. Ceux-ci, bien que partiels, semblent cohérents avec les grandes tendances qui se sont dégagées à l'issue de notre travail centré sur le concept d'élément chimique.

Chapitre IX Ébauches exploratoires sur d'autres concepts

Synthèse de ce chapitre

-Nous proposons d'explorer trois concepts, le concept *d'ombre* (en maternelle), le concept de *pression* (au lycée en seconde générale) et le concept de *thermorégulation* (en formation des maîtres).

- Nous amorçons des tentatives de repérages des différents invariants associés pour ces trois concepts, le premier étant *par collection*, le second *par équilibre*, le troisième *par conservation-transformation et par adaptation*.

- Nous retenons, à l'issue de cette petite digression, que les hypothèses formulées sur le concept d'élément chimique ne sont pas en contradiction avec les premières tendances qui se dessinent sur ces trois nouveaux concepts.

Nous terminons ce travail dans « le monde des invariants », comme nous l'avons débuté au premier chapitre, en relatant trois *histoires* vécues parmi tant d'autres, qui nous ont conduits, à l'ascension des concepts d'*ombre*, de *pression* et de *thermorégulation* (respectivement en maternelle, au lycée, et en institut de formation). Nous présentons ici les descriptifs de ces trois expériences, ainsi que les explorations en cours, lesquelles pourraient aussi nourrir l'intérêt de la liaison *invariant-concept*.

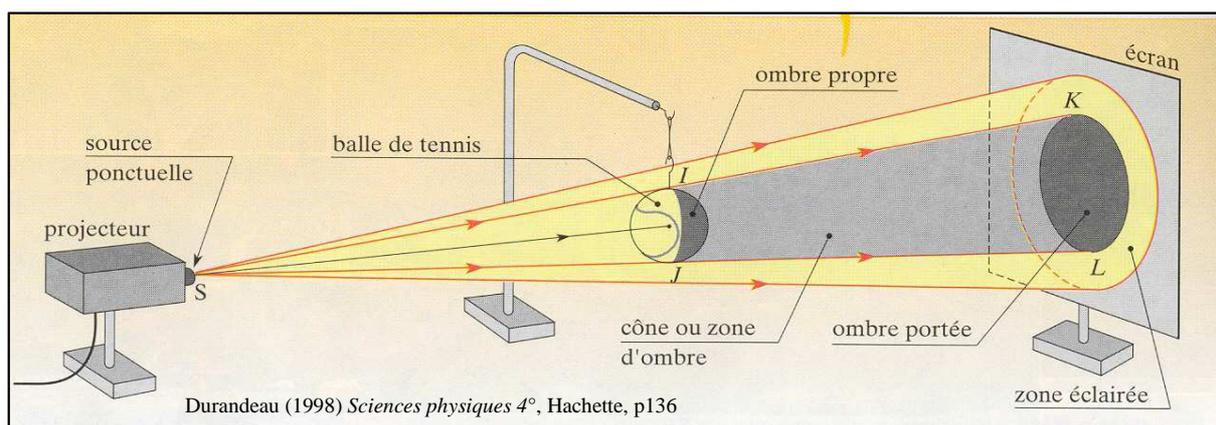
I- Le concept d'*ombre*

I-1 Quelques éléments de contexte

Sur le concept d'*ombre*, l'expérimentation a été menée en mai 2007 (puis reprise en 2009), dans une classe d'une vingtaine d'enfants de moyenne et grande section de maternelle d'une collègue maître formatrice (Mme Fraszczynski), qui intervient régulièrement sur l'antenne de Périgueux à l'I.U.F.M d'Aquitaine. Cette collègue exerce sur Périgueux dans l'école d'application de Clos Chassaing. Nous avons, ensemble, construit un module d'apprentissage qui est désormais en ligne sur le site internet de « l'école des sciences de Bergerac » (eds24), site relais de la fondation « La main à la pâte », dans la rubrique : Activités / La matière / Cycle1 / intitulé : *Ombres et lumière*.

I-2 Concept et invariants associés

Notre étude porte spécifiquement sur l'*ombre portée*, celle qui se situe sur un support autre que l'objet opaque lui-même¹ quand il est éclairé par une source de lumière. En effet, le terme « ombre » est, socialement, très largement assimilé à cette approche, alors qu'il existe « une autre ombre » d'un objet opaque qui, elle, est située sur l'objet lui-même. On parle alors d'*ombre propre*.



Ce concept scientifique est lié à un ensemble d'invariants par collection dont la liste de ceux travaillés dans la séquence avec les élèves peut, ci-dessous, être ainsi résumée :

L'*ombre portée* d'un objet opaque :

- n'est pas de la matière (1)
- est noire quelles que soient la couleur et sa forme (2)
- n'a pas de détail à l'intérieur (3)
- est reliée² à l'objet lui-même (4)
- est soumise à des conditions d'obtention (5)
- peut changer d'aspect (forme-taille) (6)
- change d'orientation avec celle de la source de lumière (7)

¹ L'ombre située sur l'objet-même est appelée « ombre propre ». L'ombre portée peut être définie ainsi : « L'ombre portée d'un objet opaque est la zone noire non éclairée située sur un support autre que l'objet lui-même ».

² Il est à noter que cela n'est pas toujours très évident à concevoir.

Nous n’imaginons pas qu’un élève de maternelle puisse exprimer la définition académique du concept d’*ombre portée*. C’est la raison pour laquelle nous considérerons que le niveau d’acquisition du concept pour des élèves de cet âge sera directement lié à leur capacité à identifier correctement le plus grand nombre d’invariants *par collection* associés à ce concept. Nous devons alors définir, par la suite, les différents niveaux d’acquisition du concept en fonction des niveaux de constructions des différents invariants. Ces derniers seront établis à partir des repérages des invariants au sein des représentations. À ce sujet, le recours à « la dictée à l’adulte » s’avère incontournable pour des enfants de maternelle.

La thématique « ombres et lumière » a déjà été utilisée comme support de recherche. Resta-Schweitzer (2010) s’en sert dans son approche « sur la formation des ombres » (bien que la qualité de l’ombre : *portée* dans cette étude ne soit pas précisée) dans une prospective de lecture psycho-cognitive.

Bien qu’elle n’en fasse pas état, le chercheur s’appuie sur les invariants liés au concept. Les quatre premières situations-problèmes proposées aux enfants³ ont pour objet d’installer les invariants qui contribuent aux conditions d’obtention d’une ombre portée.

Il nous apparaît que les paliers de la psychogénèse proposés par Piaget et Garcia⁴ pourraient être lus à travers le prisme des acquisitions des invariants.

Ainsi les différentes transitions *intra-interobjectale* et *inter-transobjectale*, pourraient être soumises à la qualité de la liaison invariant-concept.

I-3 L’approche didactique retenue – la séquence d’apprentissage

La séquence d’apprentissage était organisée en plusieurs séances suivant le descriptif ci-dessous. Nous abordons le concept d’*ombre portée* mais nous utiliserons le mot « ombre » dans les propos qui suivent. Chaque objectif visé est censé nourrir le concept en abordant les invariants *par collection*. Chaque séance approche le concept avec l’objectif de faire émerger un ou plusieurs de ses invariants.

<i>Séance</i>	<i>Titre</i>	<i>Objectifs</i>
S1	Dans la cour, à la découverte des «ombres»	Reconnaître une ombre et la distinguer d’un objet. Mon ombre est attachée à mon corps. <i>L’ombre est noire. Il n’y a pas de détails dans l’ombre.</i>
S2	Conditions d’obtention d’une ombre	Il faut une source, un objet «opaque» et un support pour obtenir une ombre. L’objet doit être situé entre la source et le support.
S3	Le théâtre d’ombres	Il existe un lien entre la forme de l’objet et la forme de son ombre. Un objet coloré a une ombre noire.
S1 (bis)		
S4	La position de l’objet	La taille de l’ombre d’un objet peut varier. La position de l’objet par rapport à la source, au support, influence sa taille.
S5	La déformation d’une ombre	Un objet peut avoir plusieurs ombres de formes différentes.
S6	La position de la source	La position de la source influence l’orientation et la taille de l’ombre d’un objet.
S1 (ter)		

Afin de pouvoir « pré-évaluer » le niveau de construction des invariants, nous avons mis en place une stratégie visant à observer leur présence au sein des représentations des élèves. Nous présentons comment nous avons plus particulièrement ciblé les invariants suivants : (1)-(2)-(3)-(4) et (6)⁵.

Chaque enfant a été invité à produire trois représentations.

- La première a été réalisée dans la cour en fin séance (S1) avec la consigne ci-dessous :

³ Cf. Thèse d’état Resta-Schweitzer (2010) p245

⁴ Cf. *supra* chap III (II-1)

⁵ Cf. *supra* chap IX (I-2)



« Dessine la maîtresse et son ombre ».

Situation dans la cour pendant laquelle les enfants construisent leur première représentation (A)

En fin de séance **S1**

- La seconde (**B**) a été produite à l'issue de la séance (S3) notée (S1 bis). La maîtresse a adopté une attitude différente mais la consigne est restée la même : « Dessine la maîtresse et son ombre ».



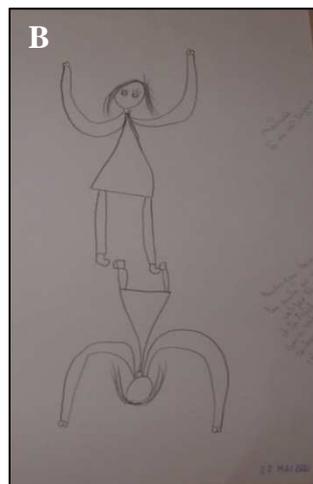
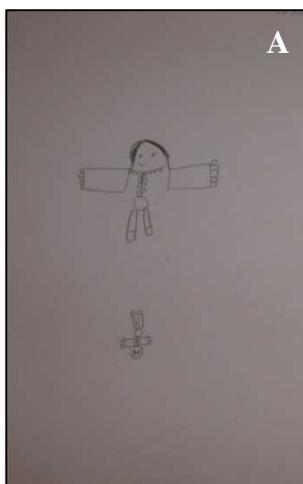
Évolution de l'attitude de la maîtresse

En marge de l'attitude (position des bras, ouverture des doigts) l'enseignante a souhaité revêtir un blazer d'une autre couleur (avec l'objectif de réinvestir l'idée vue en séance (S3) selon laquelle, quelle que soit la couleur de l'objet, son ombre est noire).

- La troisième (**C**) a été construite à la fin de la séquence, après la séance (S6) notée (S1 ter). Elle a consisté à demander aux enfants de compléter leur seconde représentation avec des crayons de différentes couleurs mis à leur disposition.

La consigne était la suivante : « Complète ton dessin en utilisant les crayons de couleur ».

La représentation **A** est à rapprocher de S1, la **B** de S1 (bis), la **C** de S1 (ter).



Trois représentations A-B-C d'un même élève

I-4 Premiers résultats

Si le système des invariants n'a pas été testé de manière exhaustive (les conditions d'obtention), les cinq invariants mis en jeu dans cette étude sont construits pour l'écrasante majorité des élèves.

Nous donnons les indices repérables retenus dans les représentations des enfants qui nous permettent de juger de leur niveau de construction des différents invariants.

Invariants	Repérages
n'est pas de la matière (1)	Distinction correcte entre la maîtresse et son ombre portée ⁶ .
est noire quelles que soient la couleur et sa forme (2)	Seule l'ombre portée est entièrement dessinée en noir.
n'a pas de détails à l'intérieur (3)	Aucun détail n'est représenté dans l'ombre portée.
est reliée à l'objet lui-même (4)	Il y a « contact » entre l'objet et son ombre portée
peut changer d'aspect (forme-taille) (6)	Il y a des correspondances de formes entre la maîtresse et son ombre portée.

Nous avons pu observer de nombreuses progressions qu'il nous faudra quantifier. Sur l'exemple de l'élève que nous donnons page précédente, dans sa représentation **A**, objet et *ombre portée* ont des proportions assez éloignées de la réalité ; par ailleurs, les détails de l'*ombre portée* font apparaître des yeux et une bouche alors qu'objet et *ombre portée* ne sont pas en contact. Les trois invariants évoqués sont désormais corrects dans la représentation **B**.

Toutes ces évolutions vers des constructions correctes des différents invariants devraient participer à une meilleure construction du concept. Les critères des différents niveaux de construction des invariants et du concept sont à construire pour pouvoir observer la qualité de leur liaison. Nous venons de décrire ce qui relèverait d'un concept scientifique lié à un système d'invariants *par collection*.

Le premier niveau d'analyse des résultats montre que la stratégie qui consiste à faire représenter plusieurs fois, permet aux enfants de faire évoluer leur niveau de construction des différents invariants. Une grande majorité des enfants est parvenue à l'issue de la troisième représentation à restituer les attributs corrects des différents invariants mis en jeu dans cette situation didactique. Cela laisse présager d'un niveau d'acquisition intéressant pour le concept.

II- Le concept de pression

II-1 Quelques éléments de contexte

L'expérimentation a été menée avec un groupe d'une dizaine d'élèves en classe de seconde générale en juin 2011, durant une séance de travaux pratiques d'une heure trente⁷. Bien que ce travail ait eu lieu en fin d'année scolaire à un moment de grande démobilité, puisque post-conseils de classes, nous tenons à remercier tous les élèves présents et l'engagement de leur professeur principal.

II-2 Concept et invariant associé

La variable qui définit le concept de pression est intensive⁸ (en Pa : Pascal). Nous abordons le concept de pression à partir de sa définition empirique : « *quotient de la force (en Newton : N) exercée perpendiculairement à un élément de surface (en mètre carré : m²) par la grandeur de celui-ci* ». Les niveaux de constructions du concept devront être établis à partir des éléments qui figurent au sein de la définition, à savoir, les notions de forces, de surface et de rapport mathématique convenablement formulé.

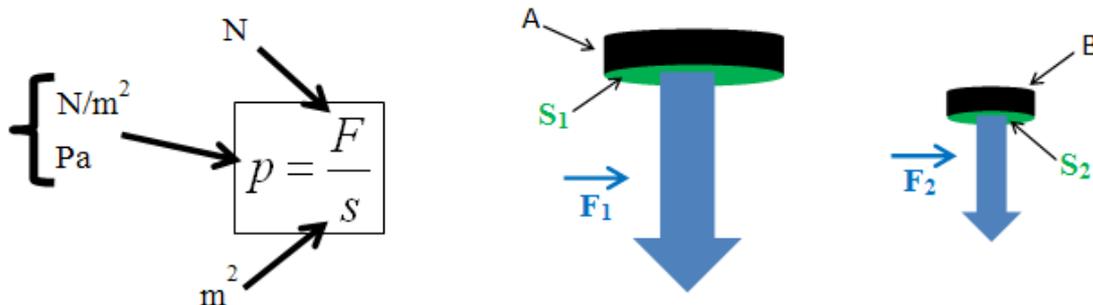
L'invariant associé à ce concept est un invariant *par équilibre*. Le concept n'a de sens que par l'existence d'un équilibre des pressions sur un système donné. La rupture de cet équilibre engendre la dégradation du système (explosion ou implosion pour ses manifestations extrêmes) jusqu'à l'obtention d'un nouvel équilibre. Sur un plan mathématique, l'équilibre peut s'écrire sous la forme suivante :

⁶ Au-delà des représentations, la dictée à l'adulte systématique permet de s'assurer de cette distinction

⁷ Avec M. Grasset à Périgueux, lequel a déjà été sollicité pour notre étude sur l'élément chimique.

⁸ Cf. *supra*. Chap IV (IV-3-1)

$F_1/S_1 = F_2/S_2$ où F_1 et F_2 représentent les intensités des forces exercées par deux objets (A et B) sur les surfaces S_1 et S_2 .



L'invariant est censé faire émerger les deux grandeurs physiques F (force exercée par l'objet sur la surface S) et S (surface sur laquelle s'exerce la force) ainsi que l'expression de leur rapport. Nous attendons des élèves qu'ils puissent définir le concept en s'aidant de l'idée qui se dégage de l'expression mathématique établie grâce à l'invariant.

II-3 L'approche didactique retenue – la séance d'apprentissage

Contrairement aux instructions officielles (*BO Spécial n°4 du 29 avril 2010*) qui préconisent d'aborder le concept sur les liquides et les gaz, nous avons choisi de travailler avec des objets solides (des sauveteurs munis de « raquettes » pour se déplacer dans la neige ↔ force exercée par les individus via la surface de leur raquette sur la neige). L'enseignant, ici, adopte une pédagogie semi-dirigée qui consiste à alterner les mises en débat et les défis, tout en imposant le matériel pédagogique susceptible de répondre aux différents problèmes proposés.

Voici le déroulement de la séance

Phase 1 :

À partir de photos⁹ de traces de « raquettes » dans la neige, nous amenons les élèves à observer les qualités de ces traces en termes de forme, de taille, de profondeur.....



Pourquoi des raquettes ? À quoi cela sert-il ? Quel en est l'intérêt ? Le débat collectif qui s'en est suivi a permis les formulations suivantes « ça permet de mieux avancer », « de moins s'enfoncer », « d'aller plus vite... » « de fournir moins d'efforts » ; d'autres suggestions ont porté sur les paramètres – qualité de la neige – surface – poids.

Phase 2 :

L'enseignant va énoncer tour à tour au groupe les deux situations suivantes (a) et (b) :

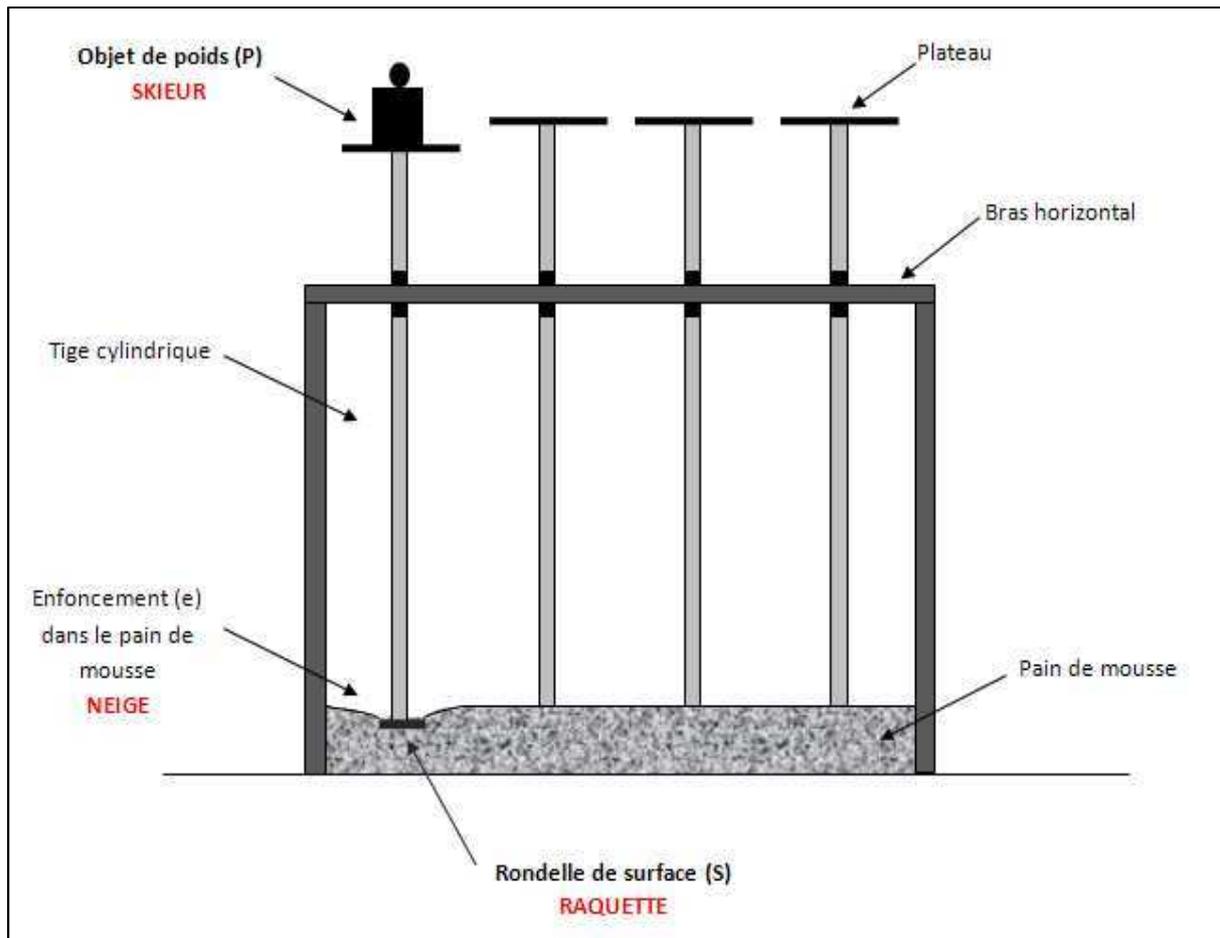
(a) « Deux sauveteurs de même poids mais avec des raquettes de surfaces différentes doivent se déplacer vers un skieur enseveli par une avalanche sur un manteau neigeux instable. D'après vous, des deux sauveteurs, lequel est celui qui devrait aller sauver le skieur ? Pourquoi ? »

⁹ http://www.actumontagne.com/raquettes-a-saint-gervais-article_0287.html

<http://rando-montagne-pyrenees.blogspot.fr/2010/10/randonnees-raquettes-balades-raquettes.html>

(b) « Deux sauveteurs de poids différents mais avec des raquettes de surfaces identiques doivent se déplacer vers un skieur enseveli par une avalanche sur un manteau neigeux instable. D'après vous, des deux sauveteurs, lequel est celui qui devrait aller sauver le skieur ? Pourquoi ? »

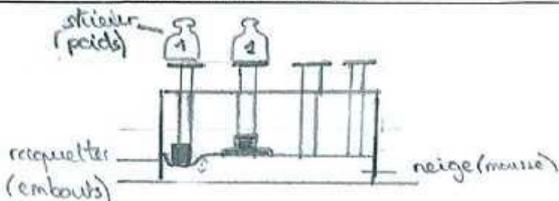
Pour chaque situation, de manière individuelle, l'élève va devoir compléter un document¹⁰ dans lequel on l'invite à proposer une hypothèse répondant au problème posé (partie intitulée « Mon hypothèse »). Par la suite, l'enseignant réalise une expérience de modélisation à l'issue de laquelle l'élève est invité à décrire ses observations (partie intitulée « Mes observations »). Enfin il lui est demandé de livrer ses interprétations (partie intitulée « Mes interprétations »).

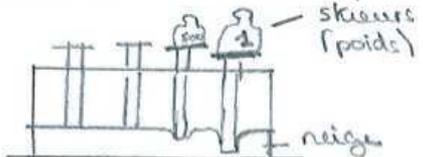


Dispositif expérimental utilisé pour la modélisation

Les deux premiers plateaux permettent de modéliser le problème (a) les deux seconds le problème (b). Pour le problème (a) l'enseignant fait varier la surface de la rondelle (surface de la raquette qui varie) tout en utilisant les deux mêmes masses marquées (poids constant). Pour le problème (b) l'enseignant fait varier les masses marquées (poids qui varie) tout en utilisant la même rondelle (surface constante). Pour chaque problème les élèves observent l'enfoncement des rondelles (raquettes) dans le pain de mousse (la neige). L'enseignant prend soin de laisser suffisamment de temps aux élèves pour qu'ils puissent produire leurs représentations sans être dans l'urgence. Les deux modélisations sont visibles par toute la classe grâce à un ensemble caméra-vidéoprojecteur.

¹⁰ Voir page suivante un exemple de document complété pour les deux problèmes proposés.

Expérience N°1	
Mon hypothèse	Mes interprétations
<p>D'après moi, le sauveteur en capacité d'aller sauver le skieur est celui avec les plus grandes raquettes.</p> <p>Son poids sera mieux réparti et il s'enfoncera moins.</p> <p>Il sera donc plus rapide.</p>	 <p>Puisque le sauveteur avec de petites raquettes s'enfonce, sa masse n'est pas assez répartie alors que celui avec de larges pieds peut répartir son poids sur les raquettes.</p>
Mes Observations	
<p>le sauveteur avec des pieds plus larges (embout plus long) ne s'enfonce pas dans la neige (meuse) alors que celui avec des petits pieds (embout court) s'enfonce quasiment à la moitié.</p> <p>Il faut préciser que les skieurs ont le même poids. (suite →)</p>	

Expérience N°2	
Mon hypothèse	Mes interprétations
<p>Je pense que le skieur le plus léger, avec la masse la moins importante, devrait aller sauver le skieur.</p>	 <p>Les deux skieurs de poids différents s'enfoncent donc différemment : celui d'1 kg s'enfonce énormément comparé à celui de 500 g.</p>
Mes Observations	
<p>le sauveteur le plus lourd s'enfonce d'avantage que celui deux fois moins lourd. On peut donc confirmer mon hypothèse.</p>	

Exemple de document rempli par un élève pour les deux problèmes (a) et (b) à résoudre

Phase 3 :

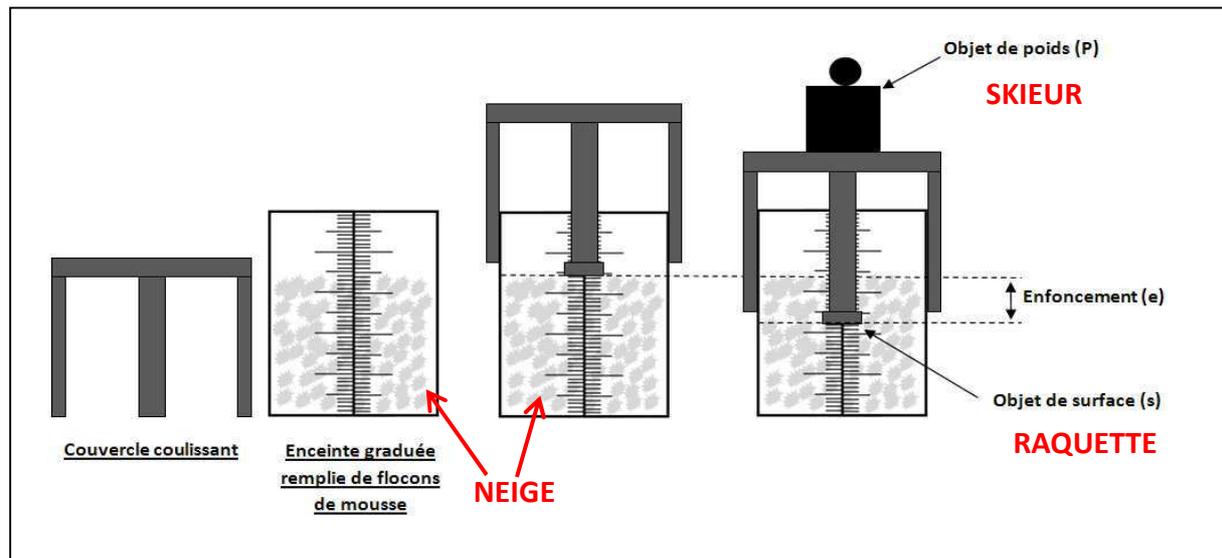
Cette fois-ci, l'enseignant évoque une situation différente bien que sur le même registre :

« Trois sauveteurs expérimentés (A, B et C) de poids très différents une fois équipés (P_A ; P_B et P_C) tels que : $P_B = 2P_A$; $P_C = 3P_A$ sont héliportés et déposés au voisinage d'une avalanche sous laquelle a été détectée une balise de détresse. Le test du manteau neigeux révèle que celui-ci est très instable ; ils décident que seul un d'entre eux peut tenter de se déplacer. Ils ont avec eux deux paires de raquettes dont ils connaissent les surfaces (S_1 ; $2S_1$). La pointure de la première (S_1) ne convient qu'aux sauveteurs A et B (case noire pour C), et la pointure de la seconde ($2xS_1$) qu'aux sauveteurs B et C (case noire pour A). Selon vous qui doit partir faire le sauvetage ? Justifier votre réponse ? »

L'enseignant retro-projette alors le tableau ci-dessous sans aucune mesure d'enfoncement (e). Les mesures ont été affichées au fur et à mesure grâce au modèle présenté ci-après.

	Sauveteur A (P_A)	Sauveteur B ($P_B = 2xP_A$)	Sauveteur C ($P_C = 3xP_A$)
S_1	e	2e	
$S_2 = 2xS_1$		e	3/2 e

Là encore c'est une nouvelle expérimentation « par modélisation » (ci-dessous) qui a pu permettre de remplir le tableau (ci-dessus).



Système expérimental qui permet de modéliser la situation

De la mousse (la neige) est placée dans une enceinte cylindrique en plastique - sur la paroi verticale est positionnée une règle graduée en millimètre – un couvercle coulisse le long du cylindre – il est muni d'une tige sur laquelle peuvent être fixés des objets de même masse mais de surface différente (raquette) – la partie haute du couvercle permet de positionner des masses marquées simulant les différents sauveteurs (poids). Entre chaque mesure, on homogénéise la mousse afin qu'elle ait toujours la même élasticité (même qualité de la neige).

II-4 Premiers résultats

Le dernier problème a été conçu afin que deux skieurs puissent réaliser le sauvetage ; l'idée était d'amener les élèves à expliquer pourquoi. Ils disposaient, comme pour les deux premiers problèmes, d'une feuille A4 (ci-dessous) gérée de la même manière que les deux premières.

Expérience N°3	
Mon hypothèse	Mes observations
D'après moi le sauveteur P_B sera plus en capacité d'aller chercher la victime avec des raquettes de surface S_2 ($2S_1$).	Grâce à ces valeurs de tableaux, on constate que le petit avec les petites raquettes (P_A, S_1) s'enfoncera seulement de 4,5 mm ; de même que celui de taille moyenne (P_B) avec les grandes raquettes (S_2).
Mes explications	
<p>Le petit de poids P_A ne pourra pas rentrer dans les raquettes S_2 (trop grandes) et le grand de poids P_C ne rentrera pas dans la paire S_1.</p> <p>$F_B = 2F_A$ et $S_2 = 2S_1$</p> <p>et donc :</p> <p>Donc il y a proportionnalité entre la masse des raquettes et celles des sauveteurs, c'est pour cela qu'ils s'enfonceront à la même profondeur. Si on envoyait le petit, il aurait plus de mal, par sa corpulence, à aider la victime. Alors que celui de taille moyenne pourra sans aucun mal la sauver.</p> <p>$F_B = 2F_A$ et $S_2 = 2S_1$</p>	

Exemple de document rempli par un élève pour le dernier problème

Pour moi le P_A devrait aller faire le sauvetage sachant qu'il est le plus léger. En effet si il prend la raquette S_1 , son poids léger, se répartira équitablement sur les raquettes, contrairement à ses coéquipiers qui sont plus lourds. Malgré le fait que P_B ai les 2 raquettes adaptées, son poids fera que son enfoncement sera plus important, tout comme P_C .

$P_B = 2P_A$ et $S_2 = 2S_1$. il y a donc proportionnalité
 entre la ~~pois~~ masse des raquettes et celle des
 sauveteurs; c'est pour cela que leur enfoncement
 est le même. Ils peuvent donc partir tous les 2.
 Or, le petit (P_A) est plus facile et donc
 aurait plus de difficultés à transporter la
 victime, il faudrait donc que ce soit
 P_B qui parte chercher la victime ~~car~~ car il
 pourra la transporter au secour et donc
 la sauver.

Après avoir fait des calcul; poids de la raquette par rapport
 au poids du sauveteur, le ~~personne~~ sauveteur P_A doit y aller :

$$\begin{aligned}
 P_A &= S_1 \times F_A = 4 \cdot 10^{-4} \times 0,50 \\
 &= \underline{2 \times 10^{-4}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_B &= S_2 \times F_B = 8 \cdot 10^{-4} \times 1,00 \\
 &= 8 \cdot 10^{-4}
 \end{aligned}$$

la valeur est plus petite pour P_A , donc c'est à lui d'aller sauver
 le skieur enseveli.

F_A et F_B ont le même enfoncement car leur différence
 de poids est comblé par la différence de surface
 des raquettes : il est question de proportionnalité.
 Le plus léger avec les raquettes qui s'enfoncent le plus
 aura les mêmes chances que le plus lourd avec les
 raquettes qui s'enfoncent le moins.

Quelques extraits du corpus (partie intitulée « Mes explications »)

S'agissant du déroulement du scénario, les élèves formulent leur hypothèse à l'issue de la lecture du problème, puis, ils relatent leur observation après que les valeurs d'enfoncement ont été établies grâce au modèle et enfin sont invités à formuler leurs explications.

La situation didactique semble favoriser l'émergence des paramètres force et surface. Mais, ce que nous retenons plus particulièrement, ce sont les représentations qui les corrélient :

« la masse n'est pas assez répartie » / « son poids léger se répartira équitablement »

Il apparaît, par ailleurs, l'idée de proportionnalité sous différentes formes :

« il y a proportionnalité entre la masse des raquettes et celle des sauveteurs »

« leur différence de poids est comblée par la différence de surface des raquettes »

Comme pour le concept d'ombre, il nous faudra, dans un premier temps, définir les différents niveaux de construction de l'invariant et du concept à partir de sa définition pour ce dernier et de ses attributs pour son invariant par équilibre.

III- Le concept de *thermorégulation*

III-1 Quelques éléments de contexte

L'expérimentation a été réalisée à l'I.U.F.M d'Aquitaine en avril 2010, sur l'antenne de Bordeaux, avec une trentaine de professeurs stagiaires (certifiés et agrégés) de sciences physiques de l'académie de Bordeaux (P.L.C 2 : Professeur stagiaire des lycées et collèges). Une partie de matinée d'une journée de formation disciplinaire nous a cordialement été laissée durant laquelle nous avons pu mener ce travail.

III-2 Concept et invariants associés

Le concept se situe « à la frontière » entre les sciences physiques et les sciences de la vie et de la Terre. Il relie entre eux deux invariants, l'un *par conservation-transformation* lié au concept d'énergie et l'autre *par adaptation* renvoyant au concept d'*autorégulation* et donc implicitement au concept de *vivant*.

Les échanges énergétiques au sein d'un convertisseur se traduisent par la loi de conservation de l'énergie. La qualité du convertisseur se détermine par son rendement et donc par sa capacité à limiter la production d'énergies inutiles (pertes) au détriment des énergies utiles. Un système qui échange de la chaleur Q avec le milieu extérieur a une énergie interne U qui se conserve.

Rappelons comment l'énonce Feynman qui traite de manière intuitive la conservation de l'énergie.

[*C'est une certaine quantité qui s'appelle énergie qui ne change pas dans les multiples modifications que peut subir la nature*].

Feynman le dit donc lui-même, le propre de l'énergie est bien de se modifier ou d'être contrainte à l'être. S'agissant de sa référence à « la nature » : comment ne pas y (voir) inclure le vivant !!

La thermorégulation renvoie implicitement au concept de *vivant*. Si Prochiantz¹¹ convoque le concept de *vivant* en mettant l'accent sur « la reproduction » et « l'évolution », il propose par ailleurs l'idée d'adaptabilité¹². Nous tentons de proposer, au risque d'être contredits par nos collègues biologistes, une définition de la thermorégulation qui serait la suivante :

Définition : « La thermorégulation est l'adaptation d'un organisme vivant qui lui permet d'autoréguler sa température afin de pouvoir survivre ».

Certains organismes ont su s'adapter à leur environnement en ayant des stratégies singulières¹³ (comme par exemple les rhopalocères qui utilisent leur organe morphologique de manière différenciée pour réguler leur température thoracique en jouant sur l'orientation de leurs ailes).

III-3 L'interview : conception et déroulement

III-3-1 La conception

L'idée conductrice est de proposer une situation qui permette de faire émerger les deux invariants. Le public étant scientifiquement armé¹⁴, il semblait intéressant de ne pas trop « montrer » les invariants mais plutôt de susciter leurs présences. L'un des deux invariants étant hors champ disciplinaire (l'invariant *par adaptation*), les enseignants étaient pour ainsi dire mis dans la position de « novices » s'agissant de la partie *régulation*.

Les questions « subliminales » de recherche étant très nombreuses, en voici quelques-unes :

- « Si les enseignants passent à côté de l'invariant *par adaptation*, vont-ils toutefois approcher le concept ? »

- « L'émergence de l'invariant *par conservation-transformation* va-t-il annihiler la réflexion générale ? »

- « L'émergence d'un invariant peut-il conditionner celle de l'autre ? »

Nous avons imaginé de rétro-projeter au groupe plusieurs diapositives dans l'ordre chronologique suivant : un loir – un rouge-gorge – un igloo – un crocodile – une colonie de manchots.

¹¹ Prochiantz (2010)

¹² Cf. *supra* Chap VIII (II-1-4)

¹³ Fleury et Grasset (2009)

¹⁴ Armé pour le concept d'énergie, mais désarmé pour celui de vivant



Sans rentrer dans l'exhaustivité de cette préparation, nous avons tenté de construire une situation volontairement « délicate ». Utiliser des organismes vivants et non-vivants, seuls ou en groupe. L'échantillon est, par ailleurs, construit avec l'idée qu'il contient *un intrus* (le crocodile) au regard d'un des deux invariants mis en jeu (*adaptation*). En effet, tous les « objets » sont de forme géométrique sphérique¹⁵ excepté le crocodile qui, lui, a une forme filaire. L'igloo est censé permettre de pouvoir généraliser ce constat au-delà des attitudes comportementales que l'on peut reconnaître chez certains animaux. Nous espérons pouvoir observer si, au fur et à mesure des observations, l'idée même d'invariant(s) va naturellement émerger – quel est celui ou ceux qui seront sélectionnés¹⁶ – et sur quels critères le seront-ils. Nous espérons créer un climat quelque peu déstabilisant¹⁷ mais qui puisse susciter interrogations fortes, intérêt, voire de la curiosité.

Nous souhaitons mettre, par la suite, en parallèle, les choix d'invariants et leurs niveaux de construction avec les niveaux de construction du concept de *thermorégulation*.

¹⁵ À volume constant, forme présentant la plus petite surface d'échange. Les échanges énergétiques (ici par chaleur d'un système avec l'air ambiant) sont (entre autres) dépendants de la forme géométrique du système. Le rapport S/V entre la surface du système et son volume détermine la qualité de la conduction thermique entre les deux milieux.

¹⁶ Il va sans dire que le choix des diapositives affiche notre volonté de créer de la discorde et doit participer à une saine émulation cognitive – nous ne perdons pas de vue que nous nous adressons à des enseignants qui peuvent aussi se décentrer du contexte et se demander pourquoi cet « individu » a choisi ces images. Quel peut être son but ? Autant de questions qui peuvent les mener sur la voie par une attitude de réflexion sur l'exercice lui-même.

¹⁷ En cela, nous essayons d'aborder la situation comme a pu le faire si adroitement Laurence Viennot (1989).

III-3-2 Le déroulement

Après s'être présenté et avoir expliqué en quoi leur coopération nous était si précieuse, et sans avoir donné la moindre explication de fond sur notre recherche, nous avons distribué à chaque enseignant stagiaire deux documents : une petite fiche *signalétique-explicative* et une série de consignes à respecter.

a/ La fiche signalétique (sous la forme d'un tableau à renseigner) :

- (AA) leur année de naissance
- (E) s'ils avaient déjà eu une expérience d'enseignement avant de rentrer à l'IUFM
- (C/A) leur corps d'appartenance C pour certifié et A pour agrégé
- (LMD) leur plus haut titre universitaire actuel
- (Co/Ly) leur établissement de rattachement Co pour collège – Ly pour lycée
- (5-4-3-2-Mpi) le type de classe dont ils ont la responsabilité

AA	E	C / A	LMD	Co/Ly	5-4-3-2-MPi
85		C	L	Ly	2 2
AA	E	C / A	LMD	Co/Ly	5-4-3-2-MPi
86		C	A1	Co	SSS 44
AA	E	C / A	LMD	Co/Ly	5-4-3-2-MPi
74	E	C	M2	Ly	2 ^{miche} et 21 ^{versas} L

Exemples de tableaux pour trois stagiaires

b/ La liste des consignes à respecter

Consignes

C1/ Dites tout ce que vous pouvez sur chaque photo (5) en mobilisant vos connaissances sous la forme de :

texte, mais aussi, croquis, dessins, schémas ; vous disposez d'une feuille recto (verso si nécessaire) par photo.

C2/ Ne pas effacer ce que vous avez écrit (rayer par exemple)

C3/ Si vous souhaitez ajouter des informations sur une feuille, après coup :

- *s'il s'agit de texte*, faites-le en entourant la première lettre du premier mot pour chaque phrase, légende....

- *s'il s'agit d'éléments de croquis, schémas, dessins* utilisez une astérisque (*) à côté de l'élément ajouté.

C4/ Pour la dernière feuille (Synthèse) vous produirez un ensemble d'informations (texte-schémas) qui vous semble(nt) rendre compte de *l'essentiel à retenir de ses images*.

Cette liste a été lue ensemble avant que ne soient distribués les dossiers¹⁸ individuels, lesquels étaient constitués de 7 pages : une page de présentation, une page par diapositive (reprenant le numéro de chaque image rétro-projetée : « *Photo N°1* » ...) et une page « *Synthèse* ».

Après avoir été pré-visionnée¹⁹ rapidement, chaque diapositive fut de nouveau projetée à intervalle de temps de cinq minutes ; enfin, pour la synthèse, une diapositive reprenant les cinq images a été rétro-projetée comme support de rappel.

¹⁸ Voir un exemplaire de dossier page suivante (ou le CD ROM pour plus d'exhaustivité) ;

¹⁹ Afin que les enseignants puissent prendre connaissance du contexte de travail

Interview du 01/04/2010

P.L.C.2

SCIENCES PHYSIQUES

Photo N°1

• La four de cette photo semble endormi, en hibernation, ou peut être malade. Je dir malade, car je n'arrive pas à dessiner si son visage est serein ou inquiet, et souffrant. Après plusieurs secondes d'observation, il semble plutôt malade au moment. Il est recroquis, "en boule", dans un creux de pierre.

Il forme de manière géométrique un cercle :



Je remarque également que son pelage est confondu avec son environnement = la couleur de sa fourrure est proche de celle que les pierres qui l'entourent tel un



Photo N°2

Rouge-gorge = Le rouge gorge me rassure, il me rappelle mon enfance, dans chez mon papa et ma mamie disparus aujourd'hui. On l'entendait dans le jardin et de le voir me rappelle cette enfance heureuse. C'est donc cette nostalgie que je regarde cette photo. En même temps, c'est un oiseau, un oiseau qui amène un sentiment de liberté, trop facile alors vous dire!

Mais oui, c'est peu original, mais le fait de pouvoir voler s'élever, fait rêver.

Et puis c'est encore étrange, car comme le bir il est parfaitement géométrique :



un cercle, même 2 cercles.



ma pierre, prêt à s'élever...



Photo N°3

Ah, Pigloo! Malheureusement, il n'est pas seul, au milieu de la banquise, au milieu de rien, mais non, il est entouré de tentes, en tissu, qui dénotent la parole et la blancheur de ce paysage.

Comme l'âtre humain occidental était venu envahir cette tribu inuite (je ne connais pas l'orthographe, voyez mon excusé)

Cette tribu, ou cette famille qui vivait dans leur tradition paisible.

En plus ces tentes ont l'air d'être des tentes de scientifiques, ils viennent donc analyser le climat, au sol.

Et puis la géométrie toujours et encore présente :



un demi-cercle et un rectangle.



Photo N°4

Le crocodile représente la force, la cruauté.
 Mais avant tout la force, de par son "recul" rugueux solide.
 Le crocodile est visuel, il attaque ces proies par surprise
 celles-ci ne le voyant pas arriver, et il les dévore aussitôt
 avec une rapidité et une puissance à faire trembler.
 Sa queue est ouverte, mais, il ne semble pas en
 position d'attaque malgré tout : comment j'affirme cela ?
 Je ne sais pas, une impression ; ces proies ne semblent pas
 sous tension par "bondir" sur une proie.




Photo N°5

Sur cette photo, on observe des marchés, nombreux,
 regroupés. Ils semblent rasés = en même temps dans
 froid, je les comprend !! ;-)

Ces marchés ne renvoient à notre société humaine, je sais
 que l'on puisse être aussi organisé et soudé, tel une
 colonie de marchés, devant l'adversité !



Synthèse :

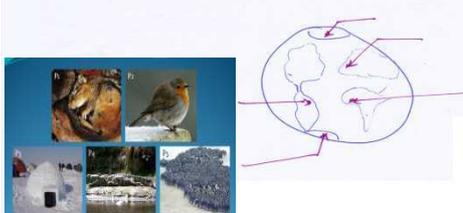
Les 4 animaux vivent dans des environnements différents.
 Tous, rencontrent des difficultés de climat différents.
 Plus à part la côté géométrique*, je ne vois pas
 bien le lien entre ces animaux.
 J'utiliserai ces images soit en art plastique, pour dessiner

- Transformation de figures géométriques :



* la forme sphérique

Singer, dans un cours d'histoire de géographie pour
 situer les lieux ~~est~~ de vie de ces
 différents animaux et objet :



Exemple de corpus d'un enseignant stagiaire PLC2 en sciences physiques (avec rappel des diapositives en fenêtre qu'il avait en visuel pour chaque feuille de son dossier). Ci-dessous à titre indicatif est donné son « profil ».

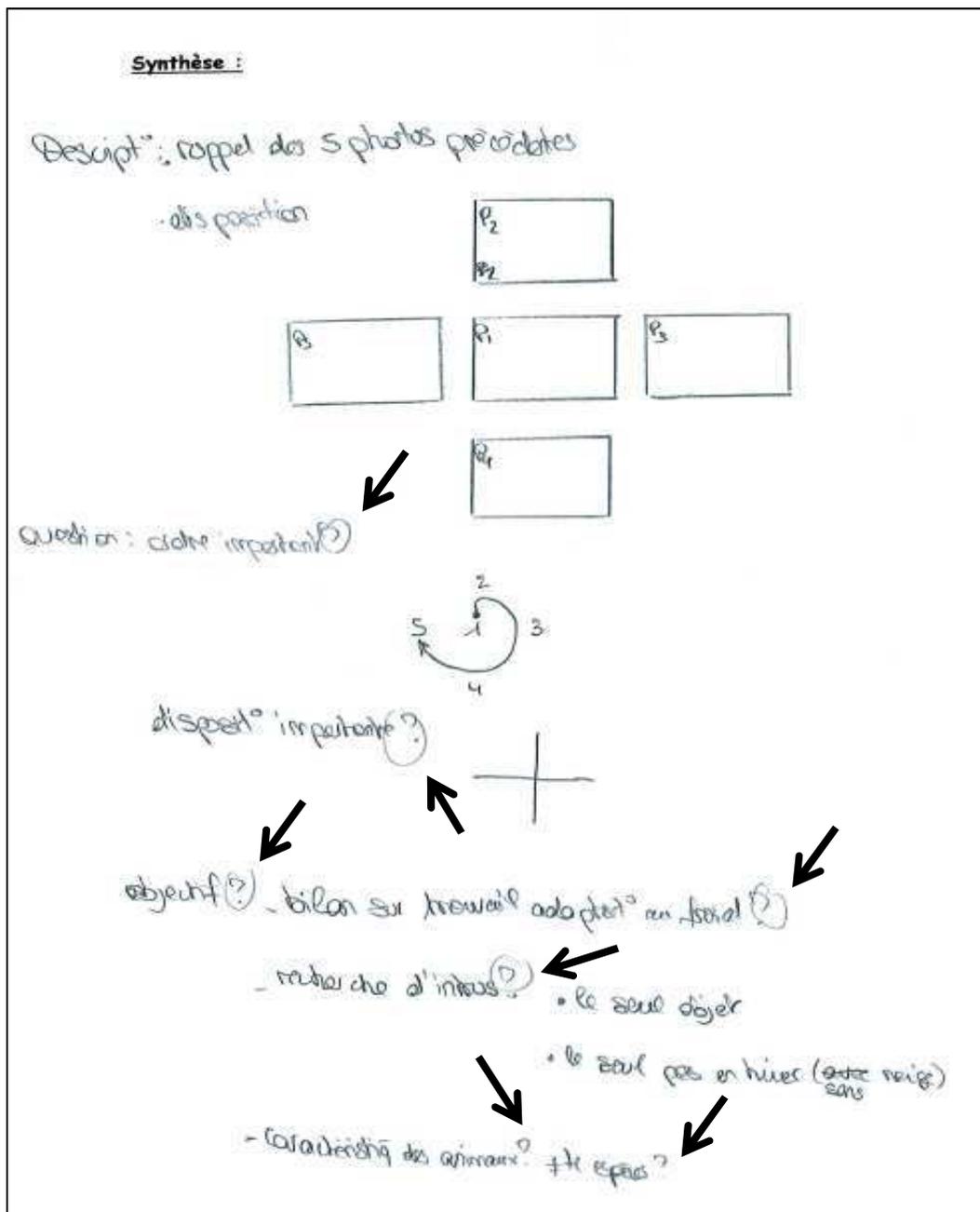
AA	E	C / A	LMD	Co/Ly	5-4-3-2-MPi
74	E	C	M2	Ly	9 ^{mde} et 21 ^{jeux} L

III-4 Premiers résultats

III-4-1 Bilan des « synthèses »

Tous les enseignants ont produit de très nombreuses représentations. Chaque photo a été effectivement décrite puis interprétée – de ce point de vue les dossiers sont le siège d'un foisonnement de R1, R2, et coordinations R1-R2.

Preuve que l'exercice a été « chargé » cognitivement, de nombreux enseignants font part de leurs doutes, de leurs hésitations en utilisant souvent le conditionnel et les formes interrogatives, comme dans la synthèse ci-dessous où le « point d'interrogation » est présent à sept reprises !!



Un point commun comportemental chez les enseignants (oserais-je dire un invariant), d'ordre cognitif, apparaît de manière criante. Tous ont cherché à trouver des « invariants » dans la collection. La consigne C4 définit l'objectif de « produire des informations qui traduisent l'essentiel à retenir ». Les synthèses en sont le témoignage lumineux. Les enseignants « ont recherché » des critères de classements (des invariants), lesquels s'organisent majoritairement au sein de la sphère scientifique.

Nous présentons l'ensemble des critères²⁰ retenus par le groupe :

- Techniques de survie face au froid ou pas
- Vivant / Non vivant - Hiver / Été

²⁰ Le symbole « / » signifie l'opposition entre critère ; le symbole « - » sépare deux choix distincts de critères.

- Aspects géométriques
- Fait la sieste - Instinct grégaire
- La nature
- Solitude / Le groupe
- Forme sphérique (minimise les échanges) / forme filaire (maximise les échanges)
- Influence du milieu sur le comportement animal (nécessaire adaptation)
- Association (animal et saison)
- Conservation de la chaleur / Evacuation de la chaleur (« concept » d'énergie thermique)
- (Zones climatiques- animaux)
- La nature - l'hiver
- Acclimatation / toujours pareil
- Jour/nuit
- Danger/ Innocence - Formes circulaires / formes curvilignes
- Adaptation des animaux à leur environnement pour survivre
- Habitat naturel / habitat urbain ou artificiel
- La vie
- La biodiversité
- Adaptation au froid
- Vie dans l'air/ sur Terre / dans l'eau et sur Terre
- Calme / Violence

Nous constatons que le domaine « animalier » prédominant des photos a fortement interrogé. Ceci peut se comprendre, dans la mesure où la thématique est volontairement conçue, en apparence, comme étant éloignée des compétences scientifiques des adultes. Notre discussion, une fois les dossiers récupérés, a montré (par les questions qui fusaient de toute part) que les enseignants avaient pris conscience du caractère souvent trompeur des préjugés. Il faut parvenir à vaincre les apparences. Certains ont reconnu, après coup, qu'ils venaient concrètement de comprendre ce que signifiait « mettre les élèves en situation de réflexion ». Nous en avons profité pour mettre l'accent sur les enjeux de la phase de mutualisation et sur les conditions préalables qui favorisent son intérêt. Nous donnons ci-après quelques exemples, extraits des synthèses produites.

Synthèse : A

On peut donc conclure sur ces 5 images, qu'elles montrent l'adaptation de 5 espèces au froid.

P₂ — Il est adapté au climat sans avoir besoin d'utiliser une astuce.

P₅ P₁ P₃

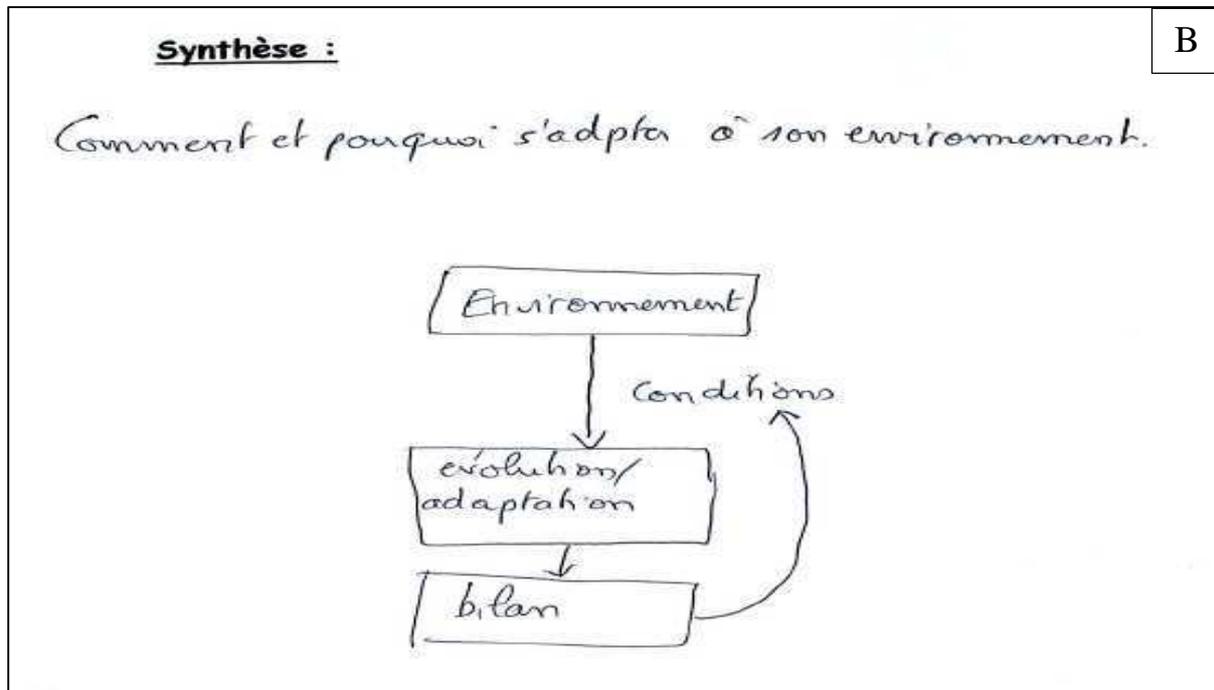
Ils ne sont pas forcément adaptés et doivent avoir recours à des astuces pour survivre.

P₄
/

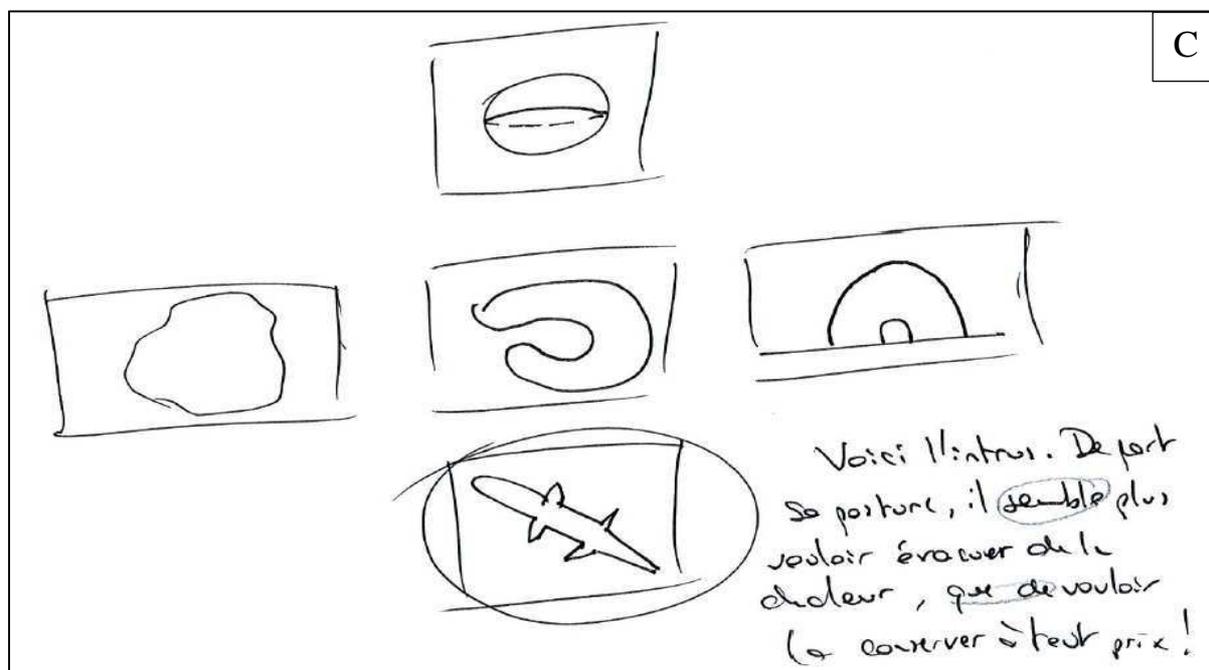
le crocodile n'est pas adapté au froid.

Ci-dessus (Synthèse A), nous pouvons observer que l'invariant *par adaptation* est évoqué sans que l'idée de forme (sphère) le soit clairement (« une astuce » - « ..avoir recours à des astuces.. »); en revanche, le concept lié à cet invariant est abordé « ..pour survivre ».

Le rouge-gorge (la vignette P2) n'est pas identifié comme s'adaptant au froid, bien qu'il soit représenté « en boule » pour se rapprocher de la forme sphérique.



Dans cette représentation (ci-dessus B), nous pouvons de nouveau repérer l'idée d'adaptation « ..s'adapter à son environnement » - « adaptation ») sans que le concept soit évoqué. L'enseignant a répondu au « Comment » qu'il a noté mais pas au « pourquoi ».



Dans la représentation C ci-dessus, le concept d'énergie est abordé avec « la chaleur » ainsi que l'idée de conservation « conserver ». En revanche, le concept de survie est absent et son invariant par adaptation reste sous-jacent « sa posture ».

Synthèse :

Se pose avoir un point commun entre toutes ces images, qui est la perte de chaleur.

forme sphérique → minimise les pertes échanges
forme filaire → maximise les échanges

crocodile → forme filaire

igloo, rouge gorge, loir, manchot → se rapproche tout qu'il peuvent d'une forme sphérique.

D

Dans la représentation D, l'enseignant affiche dès le départ qu'il a repéré « le point commun entre toutes ces images ». Il identifie le concept d'énergie (chaleur) et construit une association avec l'invariant *par adaptation* en réalisant un lien entre forme (« sphérique » et « filaire ») et nature des échanges énergétiques (« minimise » ou « maximise »).

Synthèse :

On a pu voir 3 scènes de passant
d'hiver au moins au froid : - loir (si on considère qu'il hiberna)
- igloo
- manchots

et 1 scène ayant lieu dans un pays chaud : crocodile.

Quatre images représentent des animaux et une des hommes.

Dans 3 images on peut voir 1 seul individu (oiseau, crocodile, loir) et dans 2 autres plusieurs individus. (manchots, campement).

Milieu froid

Loir
Campement avec igloo
Manchots

Habitat naturel

crocodile
Loir
Manchots

Milieu chaud

Crocodile

Habit urbain ou artificiel

Campement
Rouge-gorge si on imagine que la pierre taillée est l'œuvre de l'homme

E

Synthèse :

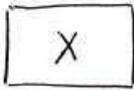
Les photos 1, 2 et 4 représentent un animal et font appel à deux saisons : l'hiver et l'été.

J'aurais regroupé ces photos ensemble car elles font appel à la solitude. Ces animaux sont tous seuls.

J'aurais regroupé les photos 5 et 3 car elles représentent toutes les deux la banquise et car elles font penser au groupe.

On voit un campement avec des personnes donc des groupes et des manchots qui sont en groupe.

* Au final 2 catégories :



la solitude



le groupe.

Dans les représentations **E** et **F**, si aucun des concepts n'est repéré et si aucun des invariants n'est abordé, nous constatons néanmoins qu'un travail de recherche d'invariants *par collection* est tenté. Ces invariants permettent aux deux enseignants de proposer un classement des images au regard de critères comme les dichotomies suivantes :

- Milieu chaud / milieu froid
- Habitat naturel / Habitat urbain ou artificiel
- Solitude / Groupe

Si nous nous attendions, dès le départ, à ce que les enseignants soient en difficulté réelle ou relative devant cet exercice, nous ne pensions pas que les propositions pourraient être aussi éloignées de leur cursus universitaire (scientifique).

Nous observons que, pour celles et ceux qui se sont retrouvés en difficulté à réinvestir leur compétences scientifiques acquises, toutes et tous ont cependant cherché « à se sauver », en allant trouver refuge dans des invariants *par collection*, comme si ces derniers se posaient comme ultime recours à une compréhension générale qui leur avait échappé.

III-4-2 Repérages des indices liés aux deux invariants

Nous donnons quelques exemples d'indices au sein du corpus qui permettent de repérer la construction des deux invariants liés au concept de *thermorégulation*.

Photo N°1	Photo N°2	Photo N°3	Photo N°4	Photo N°5
Il dort recroquevillé sur lui-même en position fœtale.	Il est renfermé sur lui-même, la tête dans les épaules.	Je vois un rond blanc... la forme circulaire d'un igloo.	Le crocodile est étalé - il est allongé sur le ventre.	Ils sont serrés les uns contre les autres.

Exemples d'indices pour l'invariant *par adaptation*

Photo N°1	Photo N°2	Photo N°3	Photo N°4	Photo N°5
<i>Il essaie d'avoir une faible consommation d'énergie.</i>	<i>Il est assez gros, il a des réserves de graisse</i>	<i>Il peut minimiser les pertes de chaleur</i>	<i>Il veut conserver une température acceptable</i>	<i>Peut-être s'entassent-ils pour se réchauffer ?</i>

Exemples d'indices pour l'invariant par conservation-transformation

Comme pour les deux concepts précédents (*Ombre portée* et *pression*), il nous faudra bâtir de toutes pièces les différents niveaux de construction des deux invariants et les niveaux de construction du concept afin de pouvoir donner des éléments objectifs de l'intérêt des liaisons I_x-C_y repéré avec le concept d'élément chimique.

Bilan général de ces trois explorations, en l'état de l'avancée des exploitations:

Nous découvrons au fur et à mesure de nos investigations l'intérêt potentiel de ces différentes liaisons invariant(s)-concept. Nous prenons également conscience que chaque concept rend compte d'une spécificité qui lui est propre. Même si nous proposons de les observer par le spectre des invariants associés, force est de constater que chaque concept scientifique est « unique »²¹. En effet, s'il est toujours envisageable de convenir d'un nombre déterminé de niveaux de constructions des invariants et du concept, les critères à retenir pour identifier ces niveaux ne peuvent pas être systématiquement transposables.

Ces trois explorations nous montrent que les sujets sont « réceptifs » aux invariants et ce, qu'ils soient des enfants ou des adultes. Les plus jeunes progressent dans la construction du concept scientifique grâce à la mise en œuvre didactique qui suscite l'émergence des invariants, alors que les adultes, eux, « vont chercher » les (des) invariants pour pouvoir répondre à un travail cognitif nouveau.

Nous retenons, à l'issue de cette petite digression, que les hypothèses formulées sur le concept d'élément chimique ne sont pas en contradiction, bien au contraire, avec les premières tendances qui se dessinent sur ces trois nouveaux concepts.

²¹ Cf. *supra* Chap IV (III-4)

CONCLUSION GENERALE

Nous allons désormais faire un bilan de notre parcours, tout en insistant sur les principaux éléments à retenir de notre recherche (lesquels seront notés en gras au sein des chapitres de la seconde partie).

La première partie est consacrée à la revue de questions théoriques alors que l'exploitation des données fait l'objet de la seconde partie.

Première partie :

Ce premier chapitre nous a permis de décrire la manière dont notre intérêt pour les invariants avait pu émerger au fil de notre parcours, en nous appuyant sur des situations marquantes susceptibles d'illustrer ce cheminement. Nous avons ensuite présenté les grandes lignes de l'outil pédagogique qui est de plus en plus utilisé, sur le terrain, par les enseignants : « la démarche par investigation ». Nous avons pu ainsi faire émerger tout son intérêt et particulièrement la manière dont l'outil met l'élève en situation de devoir « raisonner ». **(Chapitre 1)**

Nous avons fait le point, dans ce chapitre, sur les différentes théories de l'apprentissage et les paradigmes actuellement reconnus comme tels (l'associationnisme, la théorie de la forme, la théorie opératoire, la théorie de la médiation, le cognitivisme fort et le connexionnisme), en les décrivant avec précision. Nous ne nous sommes pas autorisés à hisser la proposition nouvelle de Sensevy (théorie de l'action conjointe, 2011) au rang de paradigme. Nous avons interrogé en particulier celle portée par Varela, sur l'*énaction*. À l'issue de ce chapitre, nous avons suggéré de penser l'acte d'enseignement, en recherchant la meilleure adéquation entre ce que peut apporter un paradigme et ce qui relève des exigences de la situation d'enseignement. **(Chapitre 2)**

Ici, le chapitre a été centré sur la représentation. Nous avons tout d'abord réalisé un état des lieux des différentes approches conceptuelles existantes de la notion de représentation. Puis nous avons abordé sa complexité et repéré les possibilités de construction du concept. Par la suite, nous avons interrogé le rôle que les différents paradigmes de l'apprentissage font jouer à la représentation. Enfin, nous nous sommes intéressés aux différentes propositions de catégorisations des représentations en donnant pour chacune d'entre elles sa spécificité. Pour ce chapitre, nous avons interrogé le cadre théorique lié aux concepts, qu'ils soient scientifiques ou non. Puis nous nous sommes attardés sur les premiers, ceux qui nous intéressent le plus et qui sont au centre de notre recherche. Nous avons donné le cadre théorique relatif au concept d'élément chimique (lequel est le support de notre étude), tant celui-ci reste appréhendé de manière approximative dans le second degré. Nous avons enclenché une discussion autour de la liaison invariant-concept en portant principalement notre intérêt sur ce que nous pouvions en tirer, s'agissant de la lisibilité qu'elle peut apporter aux concepts. Nous avons enfin commencé à rechercher comment les invariants sont appréhendés au sein d'autres disciplines. **(Chapitre 4)**

La question de la posture épistémologique qui est la nôtre dans cette recherche — posture fortement arrimée à l'épistémologie constructiviste, est posée au sein de ce chapitre. Nous avons caractérisé les deux épistémologies *positiviste* et *constructiviste*, ce qui nous a permis de mieux situer notre approche. Celle-ci étant construite à partir de représentations, nous avons montré que seule la position *constructiviste* — développée par Le Moigne (1995) — était envisageable pour notre démarche. Nous avons fait un rapide état de notre contexte de

travail et de notre méthode. Nous avons évoqué les raisons pour lesquelles nous avons été amené à faire évoluer nos outils, afin de pouvoir présenter nos résultats avec le plus de fiabilité possible. Enfin, nous avons explicité la manière de prendre en considération la complexité de nos objets (les représentations), et quelle était notre position éthique de chercheur. (**Chapitre 5**)

Dans la seconde partie :

Nous avons, dans ce chapitre, fait état de la première exploitation des données ainsi que de la première analyse des résultats. Nous avons décrit l'environnement dans lequel ont été récupérés les différents corpus et avons expliqué quel était notre choix expérimental pour que les élèves soient confrontés à la construction du concept d'élément chimique. Nous avons construit des supports susceptibles de laisser des espaces de liberté pour que les élèves s'expriment. Cela était motivé par notre souhait de pouvoir « suivre » les cheminements cognitifs des sujets. Nous avons procédé à une première lecture de ces représentations, à partir d'outils existants (catégories des représentations de Sallaberry) ou construits pour cette étude (niveaux de constructions de l'invariant et du concept). **Les résultats obtenus ont montré qu'il existait une relation très forte entre les constructions de l'invariant et du concept**, la construction de l'un étant conditionnée par la construction de l'autre. Nous avons par ailleurs établi les « profils » des élèves à partir des représentations construites — profils que nous avons nommés **filiation cognitive**.

À ce stade, nous avons constaté que **ce sont les élèves qui utilisent le plus grand nombre de représentations au plus près de l'invariant qui construisent le mieux le concept** d'élément chimique. (**Chapitre 6**)

Nous avons tenté, dans ce chapitre clef, à partir des premiers résultats du précédent, de rééditer notre scénario dans deux autres contextes, afin d'observer d'éventuelles confirmations des premières tendances. Nous avons revu nos outils concernant les niveaux de constructions de l'invariant et du concept, afin qu'ils soient plus objectifs et plus rigoureux. Les nouveaux résultats ont infléchi nos premières hypothèses. Ils nous permettent désormais de proposer deux hypothèses : l'une dite *hypothèse forte* et l'autre dite *hypothèse faible*. Elles peuvent être respectivement résumées ainsi :

- « **tenir le concept impose de tenir l'invariant** »
- « **tenir l'invariant facilite l'accès au concept** ». (**Chapitre 7**)

Ce chapitre a fait l'objet d'un travail d'analyse des représentations des élèves au cours du scénario, afin de réaliser un bilan des *filiations cognitives* à l'issue de notre seconde lecture des résultats (chapitre 7). Nous avons montré que mettre les élèves en situation de représenter facilitait les cheminements cognitifs dans la conquête du concept. **Nous avons constaté que dans ce processus, les représentations rationnelles (R2) semblaient jouer un rôle positif dominant, sans que soit exclu pour autant un effet bénéfique des représentations descriptives (R1)**. Nous avons abordé les enjeux didactiques liés à l'apprentissage du concept d'élément chimique à partir d'une analyse critique de quelques scénarios représentatifs proposés aujourd'hui. Cela nous a conduits à avancer quelques suggestions qui seraient susceptibles de faciliter la construction de ce délicat concept d'élément chimique. Abordant la question de la catégorisation des concepts scientifiques, nous avons suggéré que construire une catégorisation des invariants pouvait être une aide pour rendre plus lisible les concepts auxquels ils sont liés. **Nous avons mis en débat une proposition qui s'articule autour de quatre catégories pour les invariants : les invariants par collection, par conservation-transformation, par équilibre et par adaptation**. Nous avons montré en quoi les deux catégories intermédiaires sont spécifiques au domaine des sciences physiques. Enfin,

nous avons conclu sur **l'intérêt qu'il y aurait à ce que chaque discipline interroge ses propres invariants, et à lier ce travail à la formation des maîtres. (Chapitre 8)**

Nous avons réalisé, dans ce dernier chapitre, une ébauche d'exploration sur trois concepts supplémentaires : le concept d'*ombre* (en maternelle), le concept de *pression* (en seconde générale), le concept de *thermorégulation* (en formation des maîtres). Ces derniers ont été choisis pour la diversité des catégories des invariants concernés qui sont complémentaires de celui étudié dans notre recherche (invariants, *par collection* pour le concept d'*ombre*, *par équilibre* pour le concept de *pression*, *par conservation-transformation* en sciences physiques et *par adaptation* en sciences de la vie et de la Terre pour le concept de *thermorégulation*). Nous avons commencé à rechercher, pour ces concepts, des repérages d'indices d'invariants au sein des représentations des différents acteurs. **Les premiers résultats semblent aller dans le sens des hypothèses que nous avons formulées à l'issue du chapitre 7, en particulier : construire l'invariant favorise la construction du concept. (Chapitre 9).**

Nous avons tenté d'approcher au plus près la manière dont un sujet pouvait construire un concept scientifique, en sciences physiques.

En nous appuyant sur la structure (S, I, S) proposée par Vergnaud (1985), nous pensons avoir montré que la construction, par un sujet, de l'invariant associé au concept d'élément chimique, en sciences physiques, était de nature à faciliter la construction de ce dernier.

PERSPECTIVES

1- Perspectives didactiques

Nous avançons, à l'issue de ce travail de recherche, pour le concept d'*élément chimique*, que la construction du concept est liée à celle de son invariant. Nous proposons de qualifier cet invariant d'*invariant par conservation-transformation*. Si l'exclusivité des constructions entre ce concept et son invariant ne sont pas réciproques, force est de constater qu'il existe bel et bien un lien entre les deux, ce qui nous a amenés à formuler l'hypothèse forte : « *tenir le concept impose de tenir l'invariant* ».

Ce premier travail a débouché tout naturellement sur une proposition²² de scénario qui prend en considération les résultats de cette recherche. Celle-ci met en scène l'invariant afin de faciliter son émergence. Elle s'organise autour de la polysémie du mot « cuivre », qui, par sa controverse, initie la réflexion sur « ce qui se conserve » et, par effet miroir, sur « ce qui ne se conserve pas » lors des différentes transformations chimiques proposées. L'utilisation des représentations est au cœur de la situation didactique dans la mesure où l'enseignant s'appuie sur elles pour alimenter les contradictions, mais aussi pour aider les élèves à mieux raisonner. Cette idée d'invariant n'en est pas à son premier coup d'essai. En effet, dès les années 1970, la commission Lagarigue avait déjà imaginé mettre en avant, pour construire le concept scientifique de quantité de mouvement, son invariant *par conservation-transformation*. Certes, les programmes de l'époque ne parlaient pas de l'invariant en ces termes, ils utilisaient l'invariant sans permettre aux élèves d'en prendre toute la mesure, mais l'idée était là, et je peux dire en allant chercher loin dans mes souvenirs que « ça fonctionnait » !.

Nous ne sommes pas en mesure à ce stade, de porter notre « hypothèse forte » plus avant en proposant de la généraliser. Pour autant, les trois exploitations en cours sur des concepts scientifiques différents, *ombre, pression, thermorégulation*²³, s'adressant à des publics aussi divers que, des enfants de maternelle, des adolescents de seconde générale ou des adultes en formation, laissent entrevoir qu'au-delà du concept éprouvé dans cette recherche, des tendances similaires se dessinent.

La recherche actuelle en didactique des sciences est particulièrement centrée autour des contextes relatifs aux démarches d'investigation. Elle interroge les paradigmes de l'apprentissage (Sensevy, 2011), en s'attachant à comprendre les enjeux et les jeux des différents acteurs (Morge et Boilevin, 2007 ; De Hosson, 2008 ; Calmettes, 2012). Elle interroge les structures qui accompagnent ces démarches (Morge et Toczec, 2012) mais aussi leurs articulations (Calmettes, 2012).

La focale est dirigée vers les acteurs, leurs interactions, et les scénarios. Comment pourrait-il en être autrement !?

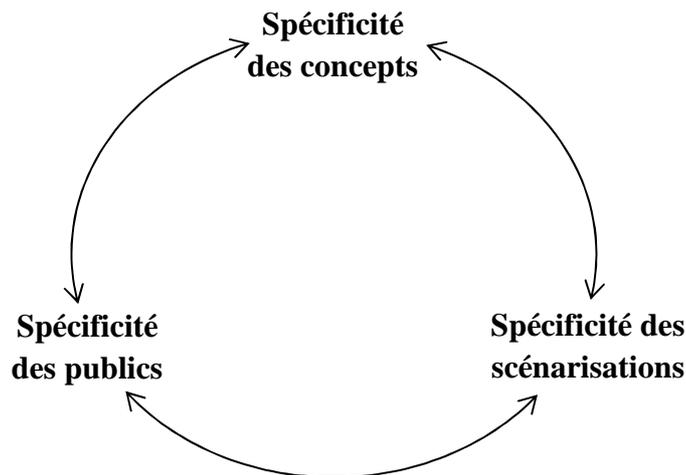
Nous souhaitons intégrer à ces « spécificités », celles relatives aux publics, d'une part, et à la scénarisation, d'autre part, une « spécificité » supplémentaire : **celle des concepts**.

Cela nous amène naturellement à poser la question de la place des concepts et de la catégorie (nature) de leurs invariants dans les choix didactiques de l'enseignant.

Nous proposons d'intégrer *la spécificité des concepts*, de manière concomitante, aux spécificités des publics et des scénarisations.

²² Fleury (2013 à paraître) Enseigner le concept d'élément chimique en seconde générale : « quelle stratégie didactique choisir ? » in, *Bulletin de l'union des physiciens*, 1269, Paris.

²³ Cf. *supra* Chap IX



Corrélations des spécificités pour préparer la classe

Il nous semble que certains concepts sont plus délicats que d'autres à aborder (c'est le cas par exemple du concept d'énergie). Ce concept apparaît pourtant dès le cycle 3 de l'école primaire. Est-il vraiment adapté à ce public ? Son invariant *par conservation-transformation* obéit à une logique hypothético-déductive qui impose à l'élève d'imaginer que « quelque chose » qu'il ne voit pas se conserve, alors que tout ce qui lui est offert d'observer ne se conserve pas. Et si la structure cognitive de ces jeunes enfants ne leur permettait pas d'appréhender un tel niveau d'abstraction ? Penser la psychogénèse d'un individu peut aussi éviter certaines entreprises vouées si ce n'est à l'échec, en tous les cas à des moments qui s'annoncent douloureux pour tous les acteurs.

2- Perspectives de recherche

Ce travail de recherche enclenché sur le statut des invariants, en sciences physiques, mérite d'être poursuivi et élargi aux différents concepts de cette discipline.

Il va de soi que ce travail, s'il est reconductible sur le fond, reste spécifique pour chaque concept. Il faudra définir les différents niveaux de constructions du concept et de son (ou de ses invariants) à chaque investigation similaire. Il faudra évaluer la force du lien entre invariant(s) et concept, laquelle ne peut être garantie comme systématiquement fructueuse.

Nous imaginons qu'à l'issue de cette recherche sur un concept, des recherches similaires pourraient voir le jour sur d'autres. Tout d'abord, pour observer les éventuelles récurrences dans la force du lien entre concept et invariant, et si cela se vérifie, pour faire partager au plus grand nombre les idées des scénarios qui pourraient en découler.

Le concept travaillé dans cette recherche, et ceux en cours de travaux, révèlent qu'il existe des invariants « génétiquement » différents. Nous suggérons, plutôt que de catégoriser les concepts scientifiques (ce qui se révèle particulièrement délicat²⁴ !), d'interroger les spécificités des invariants et d'entamer la construction d'une catégorisation (ou d'une classification). À ce stade **nous formulons une proposition de caractérisation articulée autour de quatre grandes catégories d'invariants** associés aux concepts scientifiques, **les invariants par collection, par conservation-transformation, par équilibre et par adaptation.**

²⁴ Cf. *supra* Chap IV (I)

Il nous semble que cette idée de classification des invariants, qui ne saurait être perçue comme l'abandon de toute tentative de classement des concepts, peut être féconde et utile.

Avec la proposition de la catégorie des invariants *par adaptation*, nous avons bien conscience que nous débordons de notre sphère de compétences en allant sur le terrain des sciences de la vie et de la Terre. Ce choix n'est pas un hasard. Cette discipline partage avec la nôtre des préoccupations scientifiques particulièrement imbriquées : tout d'abord parce qu'elle s'appuie très fortement sur les représentations, ensuite parce qu'elle utilise des concepts des sciences physiques explicitement (déplacement) ou implicitement (croissance). Cela explique en partie la raison pour laquelle nous avons engagé un travail sur la *thermorégulation*.

De nombreuses disciplines ont d'ores et déjà « intégré » l'intérêt qu'elles pouvaient tirer des invariants.

Vergnaud en mathématiques, depuis plus d'un quart de siècle, les porte comme des outils indispensables au sein de sa proposition de structure (S, I, S).

En histoire et géographie, les invariants sont source d'inspiration didactique dès qu'il s'agit de construire des concepts (comme ceux de « paysage » ou de « révolution » par exemple).²⁵ Ici, le second est associé à un invariant d'ordre transformationnel (par conservation-transformation).

En éducation musicale, nos collègues définissent les auteurs à travers des invariants identifiés aujourd'hui en tant que styles d'écritures, harmonie, mélodie, rythme, forme musicale ou orchestration²⁶ (ces invariants sont-ils des invariants par collection ?).

En arts plastiques, les œuvres peuvent être découvertes à partir d'invariants définis comme étant, entre autres, les actions engagées par l'artiste, les éléments plastiques dans l'œuvre, les moyens plastiques utilisés²⁷ (peut-on parler d'invariants par équilibre ?).

Nous imaginons que chaque discipline pourrait interroger les invariants qui la traversent et venir ainsi enrichir notre ébauche de catégorisation. Bien que nous nous appuyions sur des représentations et donc, par essence, sur des inférences, si des convergences devaient être établies s'agissant des liens étroits entre invariants et concepts scientifiques en sciences physiques, se poserait alors la question du statut des invariants en tant qu'objet didactique et objet de formation dans cette discipline. On voit ici en quoi la recherche, sur ces liens, peut trouver des implications très concrètes pour la formation et établir de fait une passerelle entre le chercheur et l'enseignant.

Un nombre de questionnements demeure en suspens à l'issue de ce travail dont voici ci-dessous quelques exemples :

Les invariants sont-ils des enjeux de formation ?

Les invariants sont-ils des objets génétiquement et/ou culturellement partagés ?

Les invariants sont-ils « le reflet » de notre structure cognitive ?

Certaines catégorisations d'invariants sont-elles plus cognitivement accessibles que d'autres ?

La lisibilité d'un concept est-elle due à la nature du système d'invariants auquel il est associé ?

²⁵ Deleplace et Niclot (2005)

²⁶ Dans l'épreuve technique de l'agrégation externe, nous pouvons lire : « Pour chaque extrait, le sujet précise les éléments à noter, qu'ils soient de nature mélodique, rythmique, harmonique ou qu'ils relèvent d'autres paramètres remarquables ». (<http://www.guide-concours-enseignants-college-lycee.education.gouv.fr/cid60048/agregation-externe-section-musique.html> ; consulté le 26/06/2012)

²⁷ Lagoutte (2002)

Peut-on imaginer un « dictionnaire » des catégories des invariants révélant les spécificités et/ou les convergences des disciplines ?

Doit-on penser la préparation d'une séance pédagogique en prenant en considération la spécificité des invariants ?

La conduite d'une séance peut-elle (doit-elle) être guidée par la recherche de l'émergence de(s) invariant(s) ?

Toutes ces questions montrent que beaucoup reste à faire, ce qui nous semble stimulant.

Epilogue final

« *Qu'est-ce donc que le temps ? Si personne ne me le demande, je le sais. Mais si on me le demande et que je veuille l'expliquer, je ne le sais plus* »²⁸.

Quand un enseignant doit donner de la lisibilité à un concept scientifique, peut-être trouvera-t-il une aide précieuse dans l'invariant (le système d'invariants) qui lui est associé.

« Ainsi, en confrontant nos approches et nos résultats sur des corpus communs, on a produit des résultats par lesquels on comprend mieux, globalement, le fonctionnement des pratiques enseignantes, ses « organisateurs » (M. Bru), ses invariants : c'était l'objectif. »²⁹

Si les invariants sont *inscrits* dans les organismes de formation, ne peut-on pas croire qu'ils peuvent aussi être enseignés pour ce qu'ils apporteraient à leurs usagers ?

De nombreuses questions s'ouvrent et nous promettent de belles perspectives et de nombreux échanges avec l'appui de nos collègues sur le terrain.

[Tous les points comptent, et si l'euphorie d'un essai impose prudence et humilité, il ne saurait masquer l'importance que peut revêtir la transformation qui s'en suit !!]

²⁸ *Les Confessions*, Augustin d'Hippone (trad. J.Trabucco), éd. Garnier-Flammarion, 1964, chap. 4, Livre XI, p. 264

²⁹ Entretien de Marguerite Altet avec Anne-Marie Chartier : L'analyse de pratiques – Rétrospectives et questions actuelles, *Recherche et formation*, 51, page 15

Publications, communications et vulgarisation de la recherche

Articles

- ✓ Fleury P. (à paraître 2013) : Enseigner le concept d'élément chimique en seconde générale : « quelle stratégie didactique choisir ? » *Bulletin de l'union des physiciens*, 1269, Paris.
- ✓ Fleury P. (article en phase d'expertise) L'invariant comme outil didactique favorisant la construction des concepts scientifiques — l'exemple du concept d'élément chimique et de son invariant, *Education et didactique*
- ✓ Fleury P. (article en phase d'expertise) Catégorisation des concepts ou catégorisation des invariants – Le cas des sciences physiques, *L'année de la recherche en éducation*

Chapitres dans ouvrages collectifs

Fleury P. (à paraître juin 2013), Influence(s) du contexte géographique sur la construction d'un concept scientifique au lycée, *Contextualisations didactiques : état des lieux, enjeux et perspectives*, Pointe-à-Pitre, PUAG.

Communications

- Fleury P. (2011) Invariant(s) et Concept en situation de formation, **Congrès international de l'A.F.I.R.S.E** (organisé par l'AFIRSE et l'UNESCO), communication orale, 14 au 17 juin 2011, siège de l'Unesco, Paris — Actes
- Fleury P. (2011) Influence(s) du contexte géographique, en sciences physiques, sur la construction d'un concept scientifique au lycée, **colloque international du C.R.E.E.F**, communication orale au sein du symposium : *Modélisations proposées par la théorie des représentations*, 21 au 24 novembre 2011, Pointe à Pitre — Actes
- Fleury P. (2012) La liaison invariant(s) - concept comme stratégie didactique : le cas en Sciences physiques du concept d'élément chimique au lycée. **Septièmes rencontres Scientifiques de l'ARDIST**. Actes : <http://ardist.aix-mrs.iufm.fr/wp-content//ardist2012-bordeaux-actes.pdf>

Animations pédagogiques

- Fleury P. et Dagos S (2012) « Stratégie didactique à l'école maternelle pour aborder le concept de vivant », animation pédagogique dans le cadre de la formation continue des professeurs des écoles de la circonscription de Périgueux IV, 11 janvier, école d'application de Clos Chassaing, Périgueux.
- Fleury P. et Dagos S (2012) « Stratégie didactique à l'école maternelle pour aborder le concept de vivant », animation pédagogique dans le cadre de la formation continue des professeurs des écoles de la circonscription de Périgueux IV, 18 janvier, école d'application de Clos Chassaing, Périgueux.

BIBLIOGRAPHIE

- ALTET M. (2006) Entretien de Marguerite ALTET avec Anne-Marie CHARTIER. *Recherche et formation*, 51, 11-25
- ANDLER D. (1992) Calcul et représentation : les sources, in *Introduction aux sciences cognitives*, s/d Andler, Paris, Gallimard.
- ANTHEAUME, P. (2001) Gérer l'imprévisible, se décentrer, se limiter. *Aster*, 32, 181 – 203, INRP
- ARDOINO J. (1990) L'analyse multiréférentielle des situations sociales, in *Psychologie Clinique*, 3.
- ARLOT J-E & RUATTI Ch (1986) A propos des observations des satellites de Jupiter par Galilée en 1610 - *L'astronomie* Paris, Flammarion.
- ASTOLFI J-P et al, (1997) *Mots- clés de la didactique des sciences*, Bruxelles, De Broeck.
- ASTOLFI J-P & DEVELAY M. (1989) *La Didactique des sciences*, Paris, P.U.F.
- BACHELARD G. (1934) *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, PUF.
- BACHELARD G. (1938) *La formation de l'esprit scientifique*, 11e éd., Paris, Vrin, 1980.
- BACHELARD G. (1949) *Le rationalisme appliqué*, Paris, PUF.
- BALIAN R. (1982) *Du microscopique au macroscopique - Cours de physique statistique de l'Ecole Polytechnique*, vol 1, Paris, Ellipse.
- BAILLY J-C. (1997), *L'apostrophe muette : essai sur les portraits du Fayoum*, Hazan, Paris.
- BALIAN R. (1982) *Du microscopique au macroscopique - Cours de physique statistique de l'Ecole Polytechnique*, vol 1, Paris, Ellipse.
- BARDIN L. (1977) *L'analyse de contenu*, Paris, PUF.
- BARTH B-M (1987) *L'apprentissage de l'abstraction*, Paris, Retz.
- BARTH B-M (1993) *Le savoir en construction*, Paris, Retz.
- BATESON G (1972) *Vers une écologie de l'esprit*, tr.fr. Paris, Seuil, Tome 1, 1977.
- BATESON G (1972) *Vers une écologie de l'esprit*, tr.fr. Paris, Seuil, Tome 2, 1980.
- BENSAUDE-VINCENT B. (1984). Regards sur l'histoire de l'élément chimique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 666, 1273-1284.
- BERTHIER S. (2000). *Les couleurs des papillons ou l'impérative beauté* Paris, Springer-Verlag.
- BERTHIER S. (2003) *Iridescences, les couleurs physiques des insectes* Paris, Springer.
- BLANCHET A & GOTMAN A. (1992) *L'enquête et ses méthodes : l'entretien*, Paris, Nathan
- BONAN J-P (2001) *Enseigner la physique à l'école primaire*, Paris, Hachette.
- BORVON G. (1990) 1789, dans le laboratoire de Lavoisier, in *Bulletin de l'union des physiciens*, 720, 39-56, Paris.
- BOUTHIER D. (2007) *Le rugby*. Paris, PUF.
- BOUTHIER D. et al (2008) Dynamique de production du jeu de mouvement en rugby : tendances communes et particularités au niveau international in *Science et motricité*, 64, Bruxelles, De Boeck.
- BRAUDEAU M. (2001). *Le monarque et autres sujets* Paris, Gallimard.
- BRESSON F (1987) Les fonctions de représentation et de communication, in *Psychologie*, s/d Piaget, Mounoud, Bronckart, Paris, NRF (Encyclopédie La Pléiade).
- BRONCKART J-P (1985) Vygotsky, une oeuvre en devenir, in *Vygotsky aujourd'hui*, s/d Sneuwly & Bronckart, Lausanne, Delachaux & Niestlé.
- BRUNER J. & OLVER R.R. & GREENFIEL P.M. (1966) *Studies in cognitive growth*, Wiley, New-York.
- BRUNER J. (1983) *Le développement de l'enfant, savoir faire savoir dire*, Paris, P.U.F.
- BRUNER J. (1987) *Comment les enfants apprennent à parler*, Paris, Retz.
- BRUNER J. (1990) ... *Car la culture donne forme à l'esprit*, tr.fr. 1991, Paris, Eshel.
- BRUNER J. (1996) *L'éducation, entrée dans la culture*, Paris, Retz.
- CALMETTES B. (2012) *Analyse didactique pragmatique et démarches d'investigation : l'action enseignante comme compromis*. Communication présentée aux Septièmes journées scientifiques de l'ARDiST. Bordeaux. France. mars
- CALMETTES B. (2012) Démarches d'investigation : analyses de pratiques ordinaires en classe et en formation. Perspectives curriculaires. (2012), in *Didactique des sciences et démarches d'investigation*, s/d Calmettes B. Paris, L'harmattan, 153-180.
- CHANGEUX J-P. (1983) *L'homme neuronal*, Paris, Fayard.

- CHARPAK G. & LÉNA.P & QUÉRÉ.Y (2005) *L'Enfant et la Science*, Paris, Odile Jacob.
- CHURCHLAND P.S. & SEJNOWSKI (1992) *The computational brain*, MIT Press, Cambridge.
- CLAVERIE B. (2005) *Cognitive*, Paris, L'Harmattan (Cognition et Formation).
- CODOL J-P. (1982) On the system of representations in a group situation. *European Journal of Social Psychology*, 4, 343-365.
- COHEN-AZRIA C. (2007) "Concepts-Champs conceptuels" in *Dictionnaire des concepts fondamentaux des didactiques* : Bruxelles, De Boeck, 35-40.
- COURTILLOT D. & RUFFENACH M. (2004) *Enseigner les sciences physiques*, Paris, Bordas.
- COUZIER N. (2002) *Introduction à l'histoire et à la philosophie des sciences*. Paris, Ellipses.
- CRICK F. (1994) *The astonishing hypothesis*, Scribners, New York.
- CUNY X. (1982) La fonction sémiotique dans le travail, th.Un. Bx II.
- DE CRESCENZO L. (1999) *Les grands philosophes de la Grèce antique*, Paris, De Fallois.
- De LATIL P. (1991) Systèmes physiques et systèmes biologiques, in *Systèmes Naturels, systèmes artificiels*, s/d Tinland F, Seyssel, 33-46, Champ Vallon,
- DELEPLACE M. & NICLOT D. (2005). *L'apprentissage des concepts en histoire et en géographie. Enquête au collège et au Lycée*, Reims, CRDP Champagne-Ardenne.
- De MONTPELIER. G (1973) Apprentissage et découverte des principes, in *Recherche de psychologie expérimentale et comparée*, Louvain, Bruxelles, Vander.
- DENIS M. (1979) *Les images mentales*, Paris, P.U.F.
- DENIS M. (1989) *Image et cognition*, Paris, P.U.F.
- DENIS M & De VEGA M (1993) Modèles mentaux et imagerie mentale, in *Les modèles mentaux*, Paris, Masson.
- DENIS M. (1993) Pour les représentations, in *Modèles et concepts pour la science cognitive, hommage à Jean-François Le Ny*, s/d M. Denis et G.Sabah, Grenoble, Presses Universitaires.
- DÉPLANCHE Y. (1991) *Mémo formulaire*, Paris, Casteilla.
- DÉPLANCHE Y. & FLEURY P. (1994) *Mémo collègue*, Paris, Casteilla.
- DÉPRET C. (2002) Analyse de productions graphiques d'élèves de troisième sur la poussée d'Archimède : causalité naturelle et cohérences sémiotiques, in *Didaskalia*, 21, 81-106.
- DUPUY J-P (1994) *Aux origines des sciences cognitives*, Paris, La Découverte.
- ECO U. (1984) *Sémiotique et philosophie du langage*, tr.fr; 198, Paris, PUF.
- EDELMAN G. (1992) *Biologie de la conscience*, tr.fr. Paris, Odile Jacob.
- EGGINGER J-G (2011) Présentation, in *Revue de recherches en éducation*, Spirale, 48, 3-9.
- ERNEST B. (1992) *Le miroir magique de M-C Escher*, Paris, Taschen.
- FEYNMAN R. (1999) *Le cours de physique de Feynman Mécanique 1*, Paris, Dunod, 42-53.
- FLEURY P. (à paraître 2013) Enseigner le concept d'élément chimique en seconde générale : « quelle stratégie didactique choisir ? », in *Bulletin de l'union des physiciens*, Paris.
- FLEURY P. & GRASSET S. (2008) La thermorégulation des rhopalocères, in *Bulletin de l'union des physiciens*, 902, 415-426, Paris
- FLEURY P. & GRASSET S. (2009) Thermorégulation des rhopalocères ; l'envol « Réflexion – Diffusion », in *Bulletin de l'union des physiciens*, 914, 509-547, Paris.
- FOUREZ G. (1996) *La construction des sciences*, 3^eed, Bruxelles, De Boeck.
- FREDGE G. (1892) *Sens et dénotation*, in *Zeitschrift für Philosophie und philosophische Kritik*.
- FRONTISI-DUCROUX F. (1995) *Du masque au visage : aspects de l'identité en Grèce ancienne*, Flammarion, Paris
- GALIFRET-GRANJON N. (1981) *Naissance et évolution de la représentation chez l'enfant*, Paris, P.U.F.
- GIORDAN A & De VECCHI G (2010) *Les origines du savoir*, Paris, Delachaux & Niestlé
- HEBB D.O (1961) *The organization of behavior*, New York, Science Edition.
- HOST V. et al (1976) Activités d'éveil scientifiques IV Initiation biologique, *Recherches pédagogiques*, 86, INRP.
- HULL Clark Leonard (1952) Principles of behavior : an introduction to behavior theory, in *The century psychology series*, New York, Appleton century crofts.
- I.U.P.A.C (1998) Compendium of Chemical Terminology – the Gold Book. <http://goldbook.iupac.org/PDF/goldbook.pdf>, p258 (consulté le 4-7-2012)

- JOHSUA S (2002) Les "obstacles épistémologiques" et le cadre vygotkien, in *Apprendre à l'école : perspectives piagetiennes et vygotskiennes*, s/d Brossard et Fijalkow, Bordeaux, PUF, 27-36.
- JOSHUA S. & DUPIN J-J. (1989) *Représentations et modélisations : Le débat scientifique dans la classe et l'apprentissage de la physique*. Berne, Peter Lang.
- JOHSUA S & DUPIN J-J. (1993) *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*, Paris, PUF.
- JULIEN F. (2009) *Les transformations silencieuses*, Paris, Grasset & Fasquelle.
- KARIOTOGLOU P. (1993) Pupil's pressure models and their implications for instruction in *Science and Technological Education*, Carfax publishing Ltd, 95-108.
- KHANFOUR-ARMALÉ R. & LE MARÉCHAL J-F. (2008) Construire une catégorie grâce à une analogie : cas du concept d'élément chimique, *Didaskalia*, 32, 117-157
- KHÖLER (1927) *L'intelligence des singes supérieurs*, Paris, Félix Alcan.
- KUHN T. (1962) *La structure des révolutions scientifiques*, tr.fr. 1983, Paris, Flammarion.
- LADRIERE J. (1975) Représentation, in *Encyclopédia Universalis*, Paris
- LAGOUTTE D. (2002) *Enseigner les arts visuels*, Paris, Hachette.
- LAUGIER A. & DUMON A. (2003) Obstacles épistémologiques et didactiques à la construction du concept d'élément chimique : quelles convergences ? *Didaskalia*, 22, 69-97, INRP.
- LECOINTRE G. et Le GUYADER H. (2001) *Classification phylogénétique du vivant*, Paris, Belin.
- LECOINTRE G. (2004) *Comprendre et enseigner la classification du vivant* Paris, Belin
- LEFEBVRE H. (1980) La présence et l'absence : contribution à la Théorie des représentations, Tournai, Casterman, (Synthèses contemporaines).
- LEFEBVRE H. (1985) *Qu'est-ce que penser ?*, Paris, Publisud.
- LEFORT Marc (2003). *Les constituants chimiques de la matière*, Paris, Ellipses.
- LE MARECHAL J-F et al (2007) Lien entre les différents aspects d'un concept. Cas de l'enseignement de l'élément chimique et de la classification périodique, in *Bulletin de l'union des physiciens*, 893, 443-454, Paris
- LEMEIGNAN G. & WEIL-BARAIS A. (1993) *Construire des concepts en physique*, Paris, Hachette.
- LE MOIGNE J-L. (1977) *La théorie du système général, théorie de la modélisation*, 3ème éd, Paris, PUF.
- LE MOIGNE J-L. (1999) *La modélisation des systèmes complexes*, Paris, Dunod.
- LE MOIGNE J-L. (1994) *Le Constructivisme*, Tome 1 : Des fondements, Paris, ESF.
- LE MOIGNE J-L. (1995) *Les épistémologies constructivistes*, Paris, PUF.
- LE MOIGNE J-L. (1995) *Le Constructivisme*, Tome 2 : Des épistémologies, Paris, ESF.
- LENA P. (2011) La science en héritage, texte inaugural de la séance solennelle sur « Les nouveaux défis de l'éducation » prononcé le 01-03-2011 à l'institut de France.
- LENA P. (2012) Rapprocher les professeurs de la science vivante, in *Pour la science*, 413 14-15.
- LE NY J-F. (1985) Comment (se) représenter les représentations. *Psychologie Française*, n.spé. "Les représentations", 231-238.
- LE NY J-F. (1989) *Science cognitive et compréhension du langage*, Paris P.U.F. (Le Psychologue).
- LERBET G. (1984) *Approche systémique et production de savoir*, L'Harmattan,
- LERBET G. (1986) *De la structure au système*, Maurécourt, Ed.Universitaires.
- LERBET G. (1993) *Système personne et pédagogie*, 2e éd., Paris, ESF.
- LERBET G. (1995) *Bio-cognition, formation et alternance*, Paris, L'Harmattan (Alternances et Développements).
- LHONORE J. (1986) *Des insectes et des fleurs* Paris, Le rocher.
- LHOST Y. & PETERFALVI B. & ORANGE C. (2007) Problématisation et construction de savoir en SVT : quelques questions théoriques et méthodologiques, *Symposium au colloque international AREF Strasbourg*.
- MARTINAND J-L. & VIOVY R. (1979) La notion d'élément chimique en classe de cinquième : difficultés, ressources et propositions *Bulletin de l'union des physiciens*, 613, 878-884.
- MARTINAND J-L (1986) *Connaître et transformer la matière ; des objectifs pour l'initiation aux sciences et techniques*. Bern, Peter Lang, 148 -174.
- MATHÉ S. & MÉHEUT M. & De HOSSON C. (2008) Démarche d'investigation en collège : quels enjeux ? *Didaskalia*, 32, 41-76.

- McCULLOCH W.S. & PITTS W. (1943), *A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity*, in *Bulletin of Mathematical Biophysics*, vol. 5, 115-133.
- MEMMI D. (1990) *Connexionnisme, Intelligence Artificielle et modélisation cognitive*, *Intellectica*, 9-10.
- MIGNE J. (1994) Pédagogie et représentations, *Education permanente*, 119, 11-31.
- MINSKY M. (1988) *La société de l'esprit*, Paris, Inter Editions.
- MORANDI F. (1997) Dynamique de modélisation dans la formation des maîtres. *Spirale Revue de recherches en éducation HS*, 2, 93-126.
- MORANDI F. (1998) *Modèles et Méthodes en Pédagogie*, Paris, Nathan.
- MORANDI F. (1999) Mise en œuvre d'un savoir éthique à l'école : représentations professionnelles, in *L'année de la recherche en sciences de l'éducation*.
- MORGE L. & BOILEVIN J-M. (2007) *Séquences d'investigation en physique-chimie, Collège, Lycée*. Clermont-Ferrand : Scréren, CRDP d'Auvergne.
- MORGE L. & TOCZEK M-C. (2012) Connaître les modalités d'expression des stéréotypes de genre pour éviter leur transmission : Le cas des situations d'entrée des séquences d'investigation, in *Didactique des sciences et démarches d'investigation* s/d B. Calmettes, Paris, L'Harmattan, 81-100.
- MORIN E. (1986) *La méthode 3. La connaissance de la connaissance*, Paris, Seuil.
- MOSCOVICI S. (1984) Le domaine de la psychologie sociale. in S.Moscovici (dir.) *Psychologie sociale*, Paris, P.U.F.
- MOSCOVICI S. (1989) Des représentations collectives aux représentations sociales : éléments pour une histoire, in D. Jodelet (dir.), *Les représentations sociales*, Paris, P.U.F.
- MOUCHET A. et al (2008) Dynamique de production du jeu de mouvement en rugby : tendances communes et particularités au niveau international in *Science et motricité*, 64, Bruxelles, De Boeck.
- ORANGE C. & PETERFALVI B. & LHOST Y. (2007) Problématisation et construction de savoir en SVT : quelques questions théoriques et méthodologiques, *Symposium au colloque international AREF Strasbourg*.
- PAIVIO et al (1968) Why are pictures easier to recall than words? *Psychonomic Science*, 11, 137-138.
- PAIVIO A. (1991) *Images in mind : The evolution of a theory*, New York, Harvester Wheatsheaf.
- PEIRCE C.S. (1885) *Ecrits sur le signe*, tr. fr. Paris, Seuil, 1978.
- PEYROUX J. (1987) *Sur les révolutions des orbites célestes* (traduction du latin en français de l'ouvrage de COPERNIC.N 1543). Paris, A.Blanchard.
- PIAGET J (1926) *La représentation du monde chez l'enfant*, rééd 1993, Paris, PUF.
- PIAGET J (1955) *De la logique de l'enfant à la logique de l'adolescent*, Paris, PUF.
- PIAGET J (1968a) *Le structuralisme*, Paris, PUF.
- PIAGET J (1969) Les méthodes nouvelles en pédagogie, leurs bases psychologiques (1935), in *Psychologie et Pédagogie*, Paris, Médiations, Ed. Denoël.
- PIAGET J (1979) La psychogénèse des connaissances et sa signification épistémologique in, *Théories du langage, théories de l'apprentissage*, Paris, Seuil.
- PIAGET J. & GARCIA R. (1983) *Psychogénèse et histoire des sciences*, Paris, Flammarion.
- PIAGET J. & GRIZE J-B et al. (1968) *Epistémologie et psychologie de la fonction*, Paris, PUF.
- POPPER K. (1959) *La logique de la découverte scientifique*, tr.fr. Paris Payot, 1973. POPPER K. (1984) *L'univers irrésolu*, Paris, Herman.
- PRIGOGINE I. & STENGERS I (1979) *La nouvelle alliance*, Folio, Paris.
- PROCHIANTZ A. (1989) *La construction du cerveau*, Mesnil-sur-l'Estrée, Hachette.
- PROCHIANTZ A. (1995) *La biologie dans le boudoir*, Paris, Odile Jacob.
- PROCHIANTZ A. (2008) *Géométries du vivant*, Espagne, Fayard.
- PROCHIANTZ A. (2010) *Construire une théorie du vivant*, De Vivevoix [CDROM] Paris, CD audio, 70 minutes.
- PROPP V. (1928) *Morphologie du conte*, tr. fr. Paris, Seuil, 1965.
- RESTA-SCHWEITZER M. (2006) *Initiation scientifique et développement intellectuel du jeune enfant*. Thèse de doctorat, Université d'Angers.
- RESTA-SCHWEITZER M. & WEIL-BARAIS A. (2007) Initiation scientifique et développement du jeune enfant, in 8° biennale de l'éducation et de l'information, 165,1-7, INRP.
- REUHLIN M. (1977) *Psychologie*, Paris, PUF.
- REY A. (1916) *Leçons de psychologie et de philosophie*, Paris, Rieder et Cie.

- RICHELLE M. (1968) *Pourquoi les psychologues ?*, Bruxelles, Mardaga.
- ROBARDET G. (1995) Situations-problèmes et modélisation ; l'enseignement en lycée d'un modèle newtonien de la mécanique. *Didaskalia*, 7, 129-143, INRP.
- ROBARDET G & GUILLAUD J-C. (1997) *Eléments de didactique des sciences physiques*, Paris, PUF.
- SALLABERRY J-C. (1993) Ecriture chimique et sémiologie, in *Seconde Conférence Internationale de Recherche sur l'Enseignement de la Chimie* (2nd E.C.R.I.C.E.), Société Internationale de Chimie, Un.de Pise actes, 419-424.
- SALLABERRY J-C. (1996) *Dynamique des représentations dans la formation*, Paris, L'Harmattan (Cognition et Formation).
- SALLABERRY J-C. (1999), "Théorie des systèmes et théorie de l'institution : la rencontre de deux paradigmes", *L'année de la recherche en sciences de l'éducation* - 1999, 5-25.
- SALLABERRY J-C (2000a) " Construction du concept de moment d'une force et représentations — Premiers résultats d'une recherche en cours ", *L'année de la recherche en sciences de l'éducation*, 75-99.
- SALLABERRY J-C (2000b), " Coordination des représentations image et des représentations rationnelles dans la construction du concept d'élément chimique ", *Didaskalia*, 17,101-121.
- SALLABERRY J-C (2000c) " Complexité des situations et théorie des systèmes ", *Les Dossiers des sciences de l'Education*, 3, 11-25.
- SALLABERRY J-C (2002a) Représentations et apprentissage des concepts scientifiques, *L'année de la recherche en sciences de l'éducation*, 19-65.
- SALLABERRY J-C (2002b) Le statut de la représentation et l'articulation du niveau logique individuel et du niveau logique collectif, in *Les représentations sociales — Balisage du domaine d'étude*, s/d C. Garnier et W. Doise, Montréal, Editions Nouvelles, 265-278.
- SALLABERRY J-C (2003a) Représentations à bords flous, représentations rationnelles, concepts, *Education Permanente*, 155, 7-38.
- SALLABERRY J-C (2003b) Théorie de l'institution et articulation individuel-collectif, in *Actualité de la théorie de l'institution*, s/d Ardoino, Boumard, Sallaberry, Paris, L'Harmattan, (Cognition et Formation),77-112.
- SALLABERRY J-C (2004b) *Dynamique des représentations et construction des concepts scientifiques*, Paris, L'Harmattan, (Cognition et Formation).
- SALLABERRY J-C (2007) Représentation et théorie du champ, "La cognitive en séminaire inter labo", *Cognitives*, 11, 11-22.
- SALLABERRY J-C (2009) L'apport du concept de représentation dans les questions de l'identité et de l'appartenance, in *Management et Cognition : questions de représentation* (dir.B.Claverie, J.C.Sallaberry, J.F.Trinquecoste), Paris, L'Harmattan (Cognition et Formation), 23-47.
- SAUSSURE F. (1915) Cours de linguistique générale, tr.fr. Paris, Payot, 1972.
- SCHNEEBERGER P. (1997) Place du concept de représentation dans la formation des enseignants : un exemple dans le domaine de la biologie-géologie in *Revue de recherche en éducation*, 2, Spirale, 263-282.
- SENSEVY.G (2002) Représentations et action didactique, in *L'année de la recherche en sciences de l'éducation*, 67-90.
- SENSEVY.G (2011) *Le sens du savoir*, Bruxelles, De Boeck.
- SIMON H.A (2004) *Les sciences de l'artificiel*, Paris, Gallimard.
- SKINNER B,F. (1969) *L'Analyse expérimentale du comportement*, trad. fr. 1971, rééd. Mardaga, 1995.
- SMOLENSKY P. (1992) IA connexionniste, IA symbolique et cerveau, in *Introduction aux sciences cognitives*, s/d Andler, Paris, Gallimard.
- STENGERS I. (1987) *D'une science à l'autre. Des concepts nomades*, Paris, Seuil.
- STÖCKER H. & JUNDT F. & GUILLAUME G. (1999) *Toute la physique*, Paris, Dunod.
- THORNDIKE E. (1898) *Animal Intelligence: An Experimental Study of the Associative Processes in Animals*. Columbia University, thèse de doctorat.
- TOLMAN T. & LEWINGTON R. (1999) *Guide des papillons d'Europe et d'Afrique du Nord* Paris, Delachaux et Niestlé.
- TOUSSAINT J. (1996) *Didactique appliquée le la physique-chimie*, Paris, Nathan

- ULLMO J. (1967) Les concepts physiques, *Logique et connaissance scientifique*, Paris, Gallimard, 623-705.
- ULLMO J. (1969) *La pensée scientifique moderne*, Paris, Flammarion.
- VARELA F-J. (1989a) *Autonomie et connaissance*, Paris, Seuil.
- VARELA F-J. & THOMPSON E & ROSCH E (1993) *L'inscription corporelle de l'esprit*, Paris, Seuil.
- VARELA F-J. (1995) Connaissances et représentations, in Dossier : Les Sciences de l'homme, *B.I.C* (Bulletin d'Information des Cadres, EDF-GDF), 27, 78-88.
- VARELA F-J. (1996) *Invitation aux sciences cognitives*, Paris, Seuil.
- VERGNAUD G. (1981) *L'enfant la mathématique et la réalité*, Berne, Peter Lang.
- VERGNAUD G. (1985) Concepts et schèmes dans une théorie opératoire de la représentation, in *Psychologie Française*, n.spécial "Les représentations", 245-252.
- VERGNAUD G. (1990) *Les sciences cognitives en débat*, Berne, Peter Lang.
- VERGNAUD G. (1991) La théorie des champs conceptuels, in *Recherches en didactique des mathématiques*, 10, 133-170.
- VERGNAUD G. (1994) Le rôle de l'enseignant à la lumière des concepts de schème et de champ conceptuel, in *Vingt ans de didactique des mathématiques en France*, Artigue, Gras, Laborde, Tavignot eds, Paris, La pensée Sauvage.
- VERGNAUD G. (1995) Théorie et concepts fondamentaux, in *Apprentissages et Didactiques, où en est-on ?* coord. G.Vergnaud, Paris, Hachette.
- VIENNOT L. (1989) L'enseignement des sciences physiques comme objet de recherche in *Bulletin de l'union des physiciens*, 716, 899-910.
- VIENNOT L. (1989) Bilan de forces et loi des actions réciproques. Analyse des difficultés des élèves et enjeux didactiques, in *Bulletin de l'union des physiciens*, 716, 951-972.
- VIGNAUX G. (1991) *Les sciences cognitives*, Paris, La découverte.
- VIOVY R (1984) La notion d'élément chimique, in *Bulletin de l'union des physiciens*, 663, 901-910.
- VYGOTSKY L-S. (1985) *Pensée et langage*, Paris, Messidor/Editions Sociales.
- VYGOTSKY L-S. (1985) Le problème de l'enseignement et du développement mental à l'âge scolaire, in *Vygotsky aujourd'hui*, s/d Sneuwly & Bronckart, Lausanne, Delachaux & Niestlé.
- VYGOTSKY L-S. (1998) *Traité des émotions*, Paris, L'Harmattan (Cognition et Formation).
- WINDSCHITL M. (2002) Inquiry projects in science teacher education: What can investigative experiences reveal about teacher thinking and eventual classroom practice? *Science Education*, 87, 12-143.
- WITTGENSTEIN L. (1922) *Tractatus logico-philosophicus*, London, Routledge & Kegan Paul.
- ZAID A. & BOYER C. & COHEN-AZIRA C. & EGGINGER J-G. (2012) Analyse de l'action d'enseignement du point de vue des performances didactiques des élèves. Faire écrire en « Découverte du monde » à l'école primaire. *Recherches en Didactiques*, 13, 85-105

INDEX DES AUTEURS

A

ALTET M, 209
ANDLER D, 42, 56
ANTHEAUME P, 9, 27
ARLOT J-E, 40
ASTOLFI J-P, 61, 79

B

BACHELARD, 59, 80
BAILLY J-C, 47
BALIAN R, 85
BARTH B-M, 9, 10, 71
BATESON G, 56
BERTHIER S, 16, 41, 177
BOILEVIN J-M, 206
BONAN J-P, 10, 59
BOUTHIER D, 5, 43, 51
BRESSON F, 62
BRONCKART J-P, 10, 36
BRUNER J, 9, 10, 22, 23, 24, 25, 26, 37, 41, 46, 48, 64, 65

C

CALMETTTES B, 9, 24, 206
CHANGEUX J-P, 41, 58
CHARPAK G, 9, 21, 22, 23
CHURCHLAND P, 10
CLAVERIE B, 5
CODOL J-P, 56
COHEN-AZRIA C, 77
COURTILLOT D, 9
COUZIER N, 40
CRICK F, 10, 38

D

De CRESCENZO L, 10, 76
De HOSSON C, 206
De LATIL P, 26
De MONTPELIER G, 9
DENIS M, 62, 63
DEPLANCHE Y, 18
DEVELAY M, 61, 79
DUMON A, 9
DUPIN J-J, 10, 60
DUPUY J-P, 10, 38, 39, 43, 55

E

ECO U, 10, 50
EDELMAN G, 10, 40, 46, 48, 49, 58
EGGINGER J-G, 5

F

FEYNMAN R, 69, 176, 191, 216
FLEURY P, 5, 17, 18, 64, 170, 191, 206
FREDGE G, 50
FRONTISI-DUCROUX F, 47

G

GALIFRET-GRANJON N, 62
GARCIA R, 31, 63, 182
GIORDAN A, 10, 59, 72, 79
GRASSET S, 5, 17, 146, 184, 191
GRIZE J-B, 93

H

HEBB D.O, 10, 40
HULL C.L, 32

I

INHELDER B, 9, 35

J

JOSHUA S, 10, 60

K

KHANFOUR-ARMALÉ R, 9, 80, 82, 171
KUHN T, 31

L

LADRIERE J, 10, 46
LAGOUTTE D, 208
LAUGIER A, 9
LE MARÉCHAL J-F, 9, 74, 80, 82, 171
LE MOIGNE J-L, 7, 10, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 99, 100, 101, 203
LE NY J-F, 10, 46, 63
LECOINTRE G, 41
LEFEBVRE H, 10, 46, 47
LEFORT M, 76
LEMEIGNAN G, 9, 10, 71, 72
LENA P, 23, 29, 93
LEWINGTON R, 41
LHONORE J, 41, 177
LHOST Y, 60

M

MARTINAND J-L, 9, 10, 76, 77, 86, 94, 95, 96, 100, 109, 172
McCULLOCH W.S, 10, 38, 56
MÉHEUT M, 60

MEMMI D, 42
MIGNE J, 71, 72
MORANDI F, 9, 22, 99
MORGE L, 24, 206
MORIN E, 92
MOSCOVICI S, 55, 56

N

NICLOT D, 83, 208

O

ORANGE C, 10, 58, 60

P

PAIVIO A, 63, 65
PEIRCE C.S, 10, 50
PETERFALVI B, 60
PIAGET J, 9, 10, 31, 32, 35, 36, 39, 42, 50, 51,
56, 57, 63, 71, 90, 96, 182
PITTS W, 10, 38, 56
PROCHIANTZ A, 10, 18, 22, 39, 41, 53, 55,
177, 178, 191
PROPP V, 85

Q

QUERE Y, 23

R

RESTA-SCHWEITZER M, 10, 63, 182
REUHLIN M, 33, 35, 37
REY A, 9, 33
RICHELLE M, 32

S

SALLABERRY J-C, 8, 9, 10, 11, 31, 35, 36,
38, 39, 43, 46, 49, 51, 52, 53, 55, 56, 57, 65,

66, 75, 76, 79, 80, 81, 84, 86, 89, 90, 91, 93,
96, 100, 101, 102, 108, 127, 204

SAUSSURE F, 50

SCHNEEBERGER P, 5, 59, 60

SEJNOWSKI T.J, 10

SENSEVY G, 5, 9, 10, 22, 25, 27, 37, 43, 59,
61, 171, 203, 206

SIMON H.A, 92

SKINNER B.F, 9, 31, 32

SMOLENSKY P, 41, 42, 57

STENGERS I, 78, 91, 92

T

THORNDIKE E, 9, 32

TOCZEK M-C, 24, 206

TOLMAN T, 41

TOUSSAINT J, 61

U

ÜLLMO J, 10, 71, 72

V

VARELA F-J, 10, 31, 35, 38, 39, 40, 41, 42,
43, 44, 54, 55, 57, 58, 84, 99, 102, 172, 178,
203

VERGNAUD G, 5, 7, 8, 10, 13, 35, 61, 62, 69,
72, 73, 74, 75, 76, 78, 79, 96, 100, 143, 173,
205, 208

VIENNOT L, 60, 192

VIOVY R, 9, 10, 96, 109, 169, 172

VYGOTSKY L-S, 9, 10, 36, 37, 62, 70, 71

W

WEIL-BARAIS A, 9, 10, 63

WINDSCHITL M, 9, 169

WITTGENSTEIN L, 17

INDEX DES MATIERES

- Action conjointe,**
Chap I (II-2 - E/) p27
- Catégorisation des invariants,**
Chap VIII (II-1 à II-1-4) p173-177
- Catégorisation des représentations,**
Chap III (II) p46-67
- Cognitivisme,**
Chap II (I-5) p38-39
- Concept,**
Chap IV (III-4) p79-80 et (IV-3-2) p86
- Concept de représentation,**
Chap III (I) p46-62
- Connexionnisme,**
Chap II (I-6) p39-41
- Constructivisme,**
Chap II (I-2),(I-3), (I-4) p33-38
- Démarche d'investigation,**
Chap I (II-1 et II-2) p21-29
- Élément chimique,**
Chap IVI (III-1) p76-77 et Chap V (II-1-1) p94-95
- Énaction,**
Chap II (II) p41-43
- Épistémologie constructiviste,**
Chap V (I) p88-93
- Filiation cognitive,**
Chap VI (II-2-2) p140-142 et Chap VII (IV-3-2) p157-158 et Chap VIII (I-1-1) p161-163
- Indicateurs de construction de l'invariant et du concept d'élément chimique,**
Chap VII (III) p148-150
- Invariant**
Chap IV (I-2) p81-84
- Invariant par adaptation,**
Chap VIII (II-1-4) p177
- Invariant par collection,**
Chap VIII (II-1-1) p173-174
- Invariant par équilibre,**
Chap VIII (II-1-2) p174-175
- Invariant par transformation-conservation,**
Chap VIII (II-1-3) p175-176
- Liaison invariant-concept,**
Chap IV (III-2) et (III-3) p77-79 ; Chap VI (II-2) p135-140 ; Chap VII p150
- Polysémie du mot cuivre,**
Chap VIII (I-2-2) p171-172
- Recadrage,**
Chap V (I) p88 et (I-2-2) p93
- Représentation,**
Chap III, p45
- Spécificité des concepts,**
Perspectives p206-207
- Structure (S,I,S),**
Chap IV (I-1 et II-2) p72-75et Chap V (II-1-2) p96

TABLE DES MATIERES

Remerciements	p5
Introduction générale	p8
PREMIÈRE PARTIE : l’investigation, les apprentissages, les représentations, les concepts, le positionnement épistémologique	p14
Chapitre I L’investigation aujourd’hui	p15
I- De <i>la belle dame</i> , à <i>Sarith</i> , en passant par <i>Maina</i>	p16
I-1 L’histoire de l’effet papillon	p16
I-2 L’histoire de la rencontre avec <i>Sarith</i>	p18
I-3 L’histoire théâtralisée par <i>Maina</i>	p19
I-4 Bilan de ces trois petites histoires	p20
II- Tenants et aboutissants d’une méthodologie pédagogique.....	p21
II-1 L’avènement de la démarche par investigation.....	p22
II-2 Résumé des coulisses de cette méthode pédagogique.....	p24
II-3 Les enjeux qui gravitent autour de l’investigation scientifique.....	p28
Chapitre II Les théories de l’apprentissage	p30
I- Les six paradigmes.....	p31
I-1 L’associationnisme	p31
I-2 La théorie de la forme (gestalt-théorie).....	p33
I-3 La théorie opératoire.....	p35
I-4 La théorie de la médiation (constructiviste-interactionniste).....	p36
I-5 Le paradigme cognitiviste (fort).....	p38
I-6 Le paradigme connexionniste	p39
II- La question des apports récents.....	p41
III- Enseigner : faire un choix de paradigme.....	p43
Chapitre III Points de vue sur les « représentations »	p45
I- La question du concept de <i>représentation</i>	p46
I-1 Les deux figures, de « l’absence-présence » et du « geste »	p47
I-2 La représentation est une notion complexe.....	p49
I-2-1 La triade <i>processus - produit- processeur</i>	p49
I-2-2 La dynamique <i>sujet – objet</i>	p50
I-2-3 La triade <i>signifiant – signifié – référent</i>	p50
I-2-4 La dynamique <i>intérieur - extérieur (individuel-collectif)</i>	p51
I-3 Proposition de concept.....	p53
I-4 Discussion.....	p53
I-4-1 L’apport des sciences cognitives	p54
I-4-2 La représentation sociale.....	p55
I-4-3 Représentations et théories de l’apprentissage.....	p56
I-4-4 Représentations et didactiques des sciences.....	p58
II La question de la catégorisation des représentations.....	p62
II-1 Diverses propositions.....	p62
II-2 La proposition de Bruner.....	p64
II-3 La proposition de Sallaberry.....	p65

Chapitre IV Points de vue sur les «concepts»	p68
I- Premières approches.....	p69
II- L'apport de Vergnaud.....	p72
II-1 La structure (S, I, S).....	p72
II-2 Les <i>champs conceptuels</i>	p74
III- Concept et définition du concept.....	p76
III-1 Le concept d'élément chimique : perspectives historiques.....	p76
III-2 La problématique des « saisons »	p77
III-3 La liaison invariant(s)-concept	p78
III-4 Tentative de définition d'un concept	p79
IV- Discussion	p80
IV-1 Vertu, et limites, de l'analogie	p80
IV-2 Le caractère universel de l'invariant	p81
IV-3 Questions en suspens	p84
IV-3-1 Grandeurs <i>intensives</i> et <i>extensives</i>	p84
IV-3-2 Le concept de concept	p86
Chapitre V Questions d'ordre épistémologique	p87
I- Le recadrage de Le Moigne	p88
I-1 Épistémologies positiviste et constructiviste	p88
I-2 Approche comparative	p89
I-2-1 Dimension gnoséologique	p89
I-2-2 Dimension méthodologique	p92
II- Méthode et réflexion sur la méthode	p94
II-1 La méthode retenue	p94
II-1-1 Retour sur le concept d'élément chimique	p94
II-1-2 L'exploitation de la structure (S,I,S) de Vergnaud	p96
II-1-3 L'exploitation de la catégorisation R1/R2/R3.....	p96
II-1-4 Recherche d'indicateurs ; élaboration d'indices de construction pour l'invariant et pour le concept.....	p97
II-1-4-1 Les premiers outils	p97
II-1-4-2 Les adaptations nécessaires	p98
II-1-5 Les filiations cognitives des sujets	p98
II- 2 Réflexions sur la méthode	p99
II-2-1 La représentation est un objet complexe	p99
II-2-2 La prise en compte de la complexité	p100
III- La position du chercheur	p101
SECONDE PARTIE : Le concept de l'élément chimique, invariant(s) et didactique, autres concepts et perspectives	p106
Chapitre VI L'élément chimique : première lecture	p107
I- Éléments de contexte et outils de récupération des données	p108
I-1 Descriptif environnemental	p108
I-2 Descriptif du protocole retenu	p109
I-2-1 Les protocoles proposés par Viovy	p109
I-2-2 Le déroulement du protocole retenu	p110
I-3 Descriptif des supports	p113
I-3-1 Les éléments informationnels utiles aux élèves.....	p114

I-3-2 Les supports pour recueillir les représentations des élèves.....	p116
II- La première lecture.....	p117
II-1 Les résultats.....	p117
II-1-1 Présentation générale du corpus.....	p117
II-1-2 L'analyse du corpus à partir de la catégorisation des représentations produites.....	p123
II-1-2-1 Bilan général des R1.....	p124
II-1-2-2 Bilan général des indices R2.....	p127
II-1-2-3 Bilan général des coordinations R1-R2.....	p131
II-2 L'intimité de la liaison invariant-concept.....	p135
II-2-1 Vers une formulation $[I_x-C_y]$ du lien entre l'invariant et son concept.....	p135
II-2-2 Vers l'idée des <i>filiations cognitives</i>	p140
Chapitre VII L'élément chimique : seconde lecture	p144
I- Intérêts et limites des résultats de la première lecture.....	p145
II- Nouveaux contextes environnementaux.....	p145
II-1 Les descriptifs.....	p145
II-2 Les deux nouveaux corpus.....	p146
III- Les nouveaux outils d'analyse.....	p148
III-1 Nouveaux niveaux de construction de l'invariant.....	p148
III-2 Nouveaux niveaux de construction du concept.....	p149
IV- Nouveaux résultats de la seconde lecture.....	p151
IV-1 Les résultats pour l'invariant.....	p151
IV-2 Les résultats pour le concept.....	p153
IV-3 Les résultats des liaisons Invariant-Concept $[I_x-C_y]$	p155
IV-3-1 Première niveau d'analyse.....	p155
IV-3-2 Seconde niveau d'analyse.....	p157
Chapitre VIII Premier bilan	p160
I-Analyse des représentations des élèves au cours du scénario.....	p161
I-1 Bilan des <i>filiations cognitives</i> avec la catégorisation $[I_x-C_y]$ de la seconde lecture.....	p161
I-1-1 Les résultats des trois groupes « 24 urbain », « 972 », « 24 rural ».....	p161
I-1-2 Analyse des résultats.....	p163
I-1-3 Pour aller plus loin.....	p164
I-2 Les propositions didactiques pour améliorer le scénario pédagogique lié à la construction de l'élément chimique en seconde générale.....	p165
I-2-1 La progression didactique.....	p165
I-2-1-1 Quelle logique de progression choisir ?.....	p165
I-2-1-2 Analyse critique d'outils existants.....	p166
I-2-2 Comment valoriser l'invariant et rendre plus lisible le concept ?.....	p170
II- Catégorisation concept/invariant.....	p172
II-1 Vers une catégorisation des invariants.....	p173
II-1-1 Les invariants <i>par collection</i>	p173
II-1-2 Les invariants <i>par équilibre</i>	p174
II-1-3 Les invariants <i>par conservation-transformation</i>	p175
II-1-4 Les invariants <i>par adaptation</i>	p177
II-1-5 Le cas particulier du concept de <i>thermorégulation</i>	p177
III- Vers une recherche pluridisciplinaire liée aux invariants.....	p178

Chapitre IX Ébauches exploratoires sur d'autres concepts	p180
I- Le concept d' <i>ombre</i>	p181
I-1 Quelques éléments de contexte	p181
I-2 Concept et invariants associés.....	p181
I-3 L'approche didactique retenue – la séquence d'apprentissage.....	p182
I-4 Premiers résultats.....	p184
II- Le concept de <i>pression</i>	p184
II-1 Quelques éléments de contexte.....	p184
II-2 Concept et invariants associés.....	p184
II-3 L'approche didactique retenue – la séquence d'apprentissage.....	p185
II-4 Premiers résultats.....	p189
III- Le concept de <i>thermorégulation</i>	p191
III-1 Quelques éléments de contexte.....	p191
III-2 Concept et invariants associés.....	p191
III-3 L'interview : conception et déroulement	p191
III-3-1 La conception.....	p191
III-3-1 Le déroulement	p193
III-4 Premiers résultats.....	p195
IV-4-1 Bilan des « synthèses ».....	p195
IV-4-2 Repérages des indices liés aux deux invariants.....	p200
Conclusion générale	p203
Perspectives	p206
Activités de recherche	p210
Bibliographie	p211
Index des auteurs	p217
Index des matières	p219
Table des matières	p220