

Enseigner la transformation chimique via le cycle du carbone pour entrer dans la culture scientifique et technique au secondaire I

Sudriès Marie ⁽¹⁾ ⁽²⁾

Ligozat Florence ⁽¹⁾

Cross David ⁽²⁾

⁽¹⁾ GREDIC, FPSE/SSED, Université de Genève – Suisse

⁽²⁾ LIRDEF, Université de Montpellier et Université Paul Valéry de Montpellier – France

Résumé

Cette étude questionne les conditions d'aménagement de séquences ordinaires d'enseignement de la transformation chimique, en France et en Suisse romande, lorsqu'il s'agit d'aborder une question complexe en classe de chimie : l'origine anthropique du réchauffement climatique. A travers la proposition d'utiliser le cycle du carbone pour enseigner la transformation chimique, nous cherchons à provoquer l'aménagement des pratiques des enseignant·e·s vers la conciliation d'un enseignement des savoirs spécifiques de la chimie au secondaire I – en particulier le modèle de la réaction chimique – et le traitement d'une question complexe. Nos premiers résultats montrent un effet significatif de notre proposition sur l'organisation des séquences des enseignant·e·s étudié·e·s, ainsi qu'une évolution de la fonction du modèle de la réaction chimique lors de l'insertion du cycle du carbone dans la séquence.

Mots clés

Transposition ; transformation chimique ; cycle du carbone ; culture scientifique et technique ; question complexe.

Contexte de la recherche et problématique

Depuis le début des années 2000, l'École doit assumer de nouveaux enjeux d'éducation qui répondent, en partie, aux défis auxquels se confrontent nos sociétés. Les problèmes environnementaux en sont un exemple. Aujourd'hui, dans la plupart des pays européens, l'enseignement scientifique ne consiste plus seulement à former la relève scientifique, mais tend à transmettre à chaque élève, une culture scientifique et technique (CST) nécessaire à l'exercice de sa citoyenneté. L'appropriation de cette CST, souvent évoquée dans les recommandations générales des programmes scolaires, nécessite de traiter des questions complexes qui intègrent les rapports des êtres humains à leur environnement. Ces questions complexes (au sens de Morin, 1982) engagent des savoirs issus de différentes disciplines, et posent donc des problèmes didactiques nouveaux, dans la mesure où les programmes scolaires restent essentiellement formulés en termes de savoirs disciplinaires. Par exemple, la compréhension de l'origine anthropique de l'accumulation du gaz dioxyde de carbone dans l'atmosphère et des conséquences sur l'effet de serre est étroitement liée au concept de transformation chimique, savoir conceptuel central du curriculum de chimie dans de nombreux pays. Celui-ci permet en effet de modéliser les phénomènes en jeu dans les processus naturels (biologiques et géologiques) comme dans les activités humaines (domestiques et industrielles). Prenons le cas de la combustion du carbone. Cette réaction chimique est souvent abordée au secondaire car elle est assez accessible expérimentalement. Au début de l'enseignement de la chimie, elle permet d'introduire un niveau de modélisation microscopique de la réaction (Kermen, 2018) : la redistribution des atomes. Le niveau macroscopique du modèle nous permet de dire, quant à lui, que la combustion du carbone consomme du gaz dioxygène et produit du gaz dioxyde de carbone. Ainsi, si on étudie une telle combustion dans le cadre des activités humaines, ce modèle spécifique de la chimie, mis en relation avec le modèle de l'effet de serre, permet d'étudier la question du réchauffement climatique. Dès lors, se pose la question de la prise en charge didactique de la porosité entre les disciplines scolaires, au service du traitement de telles questions, complexes. Nous nous intéressons alors à la transposition didactique (Chevallard, 1989/1992) du concept de transformation chimique au moment où celui-ci est introduit, dans deux contextes scolaires francophones : Suisse romande et France. Parce qu'elle « interroge les pratiques d'enseignement-apprentissage, au sens large, qui existent, se créent ou se reconfigurent en regard des attentes sociales qui s'expriment dans l'évolution des curriculums », cette proposition se place dans l'axe 2 de la thématique du colloque.

Pour aborder cette problématique, nous avons tout d'abord mené une étude comparée des modes de transposition didactique externe (Chevallard, 1985/1991) du concept de transformation chimique en France et en Suisse romande (Sudriès et al., sous presse). Cette étude met en évidence une tension dans les curricula de chimie au début du secondaire. Dans ces deux contextes, les recommandations générales pour les enseignements scientifiques promeuvent le questionnement du rapport de l'être humain à son environnement, notamment à travers l'étude des questions environnementales. Toutefois l'enseignement de la chimie au

secondaire I reste centré sur la transmission de savoirs conceptuels propres à la discipline (le modèle de la réaction chimique et le principe de conservation de la matière) tant au niveau de la définition des contenus dans les programmes/plan d'études, qu'au niveau des ressources disponibles dans les manuels/moyens d'enseignement. Au regard de cette première étude, nous nous interrogeons sur les conditions de possibilité d'un enseignement de la transformation chimique qui puisse servir les enjeux d'acquisition d'une CST par les élèves, sans pour autant négliger les dimensions conceptuelles de cet objet de savoir.

Cette question nous conduit à nous intéresser aux modes de transposition didactique internes (Chevallard, 1985/1991) du concept de transformation chimique. Ainsi, nous nous proposons d'étudier les possibilités d'accommodation de séquences ordinaires d'enseignement de la transformation chimique, en France et en Suisse romande, dans l'objectif d'étudier l'origine anthropique du réchauffement climatique. Nous cherchons en particulier à savoir : Comment l'enseignant·e de chimie peut aménager son enseignement de la transformation chimique à travers l'introduction d'une question complexe ? Pour répondre à cette question, nous nous intéresserons en particulier aux éléments précurseurs du contrat didactique, dans sa dimension pensée par l'enseignant·e.

Méthodologie : étude de la transposition didactique interne

Méthodologie de recueil des données

À l'instar de Schubauer-Leoni et Leutenegger (2002), nous adoptons une approche clinique/expérimentale du didactique ordinaire, et élaborons un recueil de données en deux phases. La Phase 1, ou phase exploratoire, consiste à observer les pratiques « ordinaires » (p. 229) des enseignant·e·s de chimie à propos du concept de transformation chimique. La Phase 2, ou phase expérimentale, se déroule l'année suivante. Nous proposons aux mêmes enseignant·e·s d'intégrer à leur séquence sur la transformation chimique, un objet issu d'un autre contexte scolaire : le cycle du carbone. Cette proposition fonctionne comme une « greffe » (au sens de Schubauer-Leoni et Leutenegger, 2002), afin d'étudier comment différents systèmes didactiques s'accommodent d'un objet qui relève de la construction d'une CST, qui n'est pas habituellement traité en classe de chimie, mais plutôt en biologie/géographie en Suisse romande, Sciences de la vie et de la Terre (SVT) en France. La démarche vise à caractériser les pratiques d'enseignement relatives à la transformation chimique. Elle consiste à contraindre le système didactique par la présence d'un élément perturbateur pouvant révéler différentes formes de contrat didactique dans les classes, en regard des priorités que l'enseignant·e identifie à l'égard de l'objet « cycle du carbone ».

Lors des deux phases d'observation, les séances de classe sont enregistrées (vidéo et audio), au moyen d'une caméra placée au fond de la salle, équipée d'un micro-cravate confié à l'enseignant·e et d'une caméra qui réalise un plan fixe sur un binôme d'élèves, désigné par l'enseignant·e. Les séquences observées sont précédées et suivies d'entretiens « ante » et « post-observations » de type semi-directif (Schubauer-Leoni et Leutenegger, 2002, p. 243) avec l'enseignant·e et deux ou trois élèves (entretien post uniquement). Ces entretiens, sont l'occasion d'aborder comment l'enseignant·e a pensé sa séquence, quels sont les enjeux d'apprentissage, puis de revenir sur la mise en œuvre effective en classe, son déroulement, les éventuelles difficultés rencontrées par les élèves. De même, les entretiens post-observations avec quelques élèves de niveaux nuancés nous donnent accès à la façon dont ils-elles ont perçu les enjeux de la séquence, ce qu'ils-elles en ont retenu. Autant de « traces » (Schubauer-Leoni et Leutenegger, 2002, p. 240), qui nous permettent de caractériser les pratiques d'enseignement-apprentissage relatives à l'objet de savoir étudié.

Nous travaillons avec deux enseignant·e·s de physique-chimie dans le canton de Genève, pour le contexte Suisse romand, et deux dans l'académie de Montpellier, pour la France. En suivant les modalités de la mise en œuvre d'une greffe qui vise à caractériser les pratiques d'enseignement (cf. paragraphe précédent), à l'issue de la première année d'observation, nous proposons à ces enseignant·e·s une représentation du cycle du carbone issue des Moyens d'enseignement romands de géographie, modifiée par nos soins. Nous les laissons libres de l'insérer comme ils-elles le souhaitent dans leur séquence. Nous nous tenons à leur disposition pour des séances de préparation en amont de la mise en œuvre, si elles-ils en manifestent le besoin. Tou·te·s nous solliciteront finalement pour une séance de travail préalable à la mise en œuvre de la séquence dans leurs classes de 4^{ème} en France, 11^{ème} en Suisse romande (élèves de 13 à 15 ans). Ces séances de préparation sont également enregistrées (audio).

Méthodologie d'analyse des données

L'analyse des données recueillies consiste en la transformation de ces traces en « signes » (Schubauer-Leoni et Leutenegger, 2002, p. 244). Pour cela, nous réalisons trois étapes de réduction de l'information : la transcription du discours et de certains gestes des séances observées à l'aide du logiciel Transana¹ et la construction de synopsis de séquence, puis de séances pour chaque enseignant·e. La construction de nos synopsis s'inscrit dans le cadre de l'étude l'action conjointe en didactique (Sensevy et Mercier, 2007), et convoque un

¹ <https://www.transana.com/>

système de représentation des actions observées à différentes échelles de temps : macroscopique, mésoscopique et microscopique (Ligozat, 2008 ; Tiberghien, Malkoun et Seck, 2008 ; Tiberghien et Sensevy, 2012 ; Marty, 2019). En ce qui concerne notre étude, l'échelle macroscopique, correspondant à la séquence sur la transformation chimique, d'une durée de plusieurs semaines. Elle nous renseigne sur l'enjeu principal d'apprentissage (N+1) visé par l'enseignant·e à travers la séquence et son déploiement en enjeux de niveau N, organisés dans les différentes séances. L'échelle mésoscopique, correspond alors à des moments pouvant regrouper plusieurs enjeux de sous-niveaux (N-1), eux-mêmes découpés en phases de l'action, en fonction des étapes élaborées pour arriver à l'enjeu visé. L'analyse microscopique enfin, s'intéresse à des interactions très courtes, de l'ordre de quelques tours de paroles (plusieurs secondes à quelques minutes), identifiées dans la dernière colonne du synopsis de séance (dernier niveau de découpage). Elle concerne en particulier les interactions des sujets à propos des objets présents dans le milieu, et le processus de co-construction des objets de savoirs.

Enjeux de la séquence (N+1)	Enjeux N
Modélisation de la transformation chimique par la réaction chimique et étude des concepts associés (équation de réaction et principe de conservation)	Définition de la transformation chimique et de l'équation de réaction, distinction des transformation chimique, transformation physique et mélange N1 <i>Séances 1-2 [48min40]</i>
	Etude qualitative de la réaction du bicarbonate de soude avec l'acide acétique : identification d'un changement de substances N2 <i>Séance 2 [14min30]</i>
	Etude quantitative de la réaction du bicarbonate de soude avec l'acide acétique : principe de conservation de la matière N3 <i>Séances 2 et 3 [50min]</i>
	Etude du cas des combustions (TP réaction de combustion du butane) : illustration des principes introduits précédemment N4 <i>Séance 4 [55min]</i>

Figure n°1 : exemple de synopsis de séquence

Classe d'Aurélie - 4 ^{ème} D - séance du 18 octobre 2021			
Séance 3 : étude quantitative de la réaction du bicarbonate de soude avec l'acide acétique			
Enjeux de niveau N (visées de l'ENS qui oriente l'action globalement)	Enjeux/tâches de niveau N-1	Phases de l'action (étapes ou organisation pour atteindre l'enjeu)	Micro-Evénements liés aux objets (significations émergentes du côté de ENS ou Els)
Etude quantitative de la réaction du bicarbonate de soude avec l'acide acétique : principe de conservation de la matière N8 [50min30]	Introduction du principe de conservation de la matière (macroscopique) N81 [02 :55 à 24 :42/ TdP 1 à 12]	Rappel de l'expérience réalisée la semaine précédente N81a [02 :55 à 06 :30/ TdP 1 à 21]	Ens TdP 15 : qu'est-ce qui s' passe quand je mets du bicarbonate de soude en contact avec du vinaigre El-Sal El-Sal TdP16 : une réaction chimique Ens TdP17 : oui comment tu le vois El-Sal TdP18 : c'est que ben quand on met quand on met du bicarbonate de soude dans le vinaigre et ben y a y a des bulles qui apparaissent ⇒ Rappel réactifs/produits
		Relevé des valeurs de masses obtenues par les éls N81b [06 :30 à 10 :00/ TdP 21 à 61]	El-II : 52 et 84 ⇒ Ens : est-ce que dans es 52 t'avais pesé le bicarbonate de soude ou t'avais mis que le vinaigre El-Sar : 10g et 10g El-Sa : 33 et 32 ⇒ Ens : ok est-ce que t'avais bien bien fermé ton bouchon El-Mar TdP34 : moi j'ai 10 centilitres c'est la même chose ⇒ Rappel de Ens sur l'unité de la masse El-Na : 117 et 117 El-Li : 602 et 604 El-Sal : 72 et 69 El-Man : 56 et 56 El-Ka : 50 et 80 Ens TdP53 : si on regarde les les résultats de El-Sar de El-Man de El-Na qu'est-ce qu'on remarque ; El-Li TdP56 : El-Li : ça stagne ; Ens TdP57 : c'est pas ça stagne le verbe mais chut il reste identique
		Introduction de la citation de Lavoisier N81c [10 :00 à 15 :03/ TdP 61 à 72]	Ens TdP71 : rien ne se perd rien ne se créé tout se transforme ; d'accord ; donc cette phrase elle a plusieurs sens on va voir ici quel sens on peut lui donner par rapport à la transformation chimique est-ce que heu cette phrase est vraie est-ce qu'on peut elle on peut la vérifier ; ou est-ce qu'au contraire elle ne fonctionne pas elle est pas ju elle est pas vérifiable au niveau expérimental on va voir ça

Figure n°2 : exemple de synopsis de séance (extrait)

Les différentes échelles d'analyse nous donnent accès à différents grains de l'évolution du contrat didactique et de sa relation avec le milieu. La mise en relation des trois échelles d'analyse est alors nécessaire pour comprendre la logique des pratiques de classes et pour identifier les extraits significatifs de la construction des objets de savoirs étudiés, dans la situation (Marty, 2019, p. 127).

Dans le cadre de cette communication, nous nous intéressons en particulier aux modifications des enjeux d'apprentissage tels qu'ils se dévoilent au fil des interactions enseignant-élèves à propos de la transformation chimique, repérés dans les synopsis. Ces enjeux peuvent être identifiés à différents grains de l'organisation de ces interactions. Dans les plus gros grains (macro et méso), ces enjeux sont assez clairement pilotés par l'enseignant : ils sont repérables par la présentation des objectifs de la séquence ou d'une séance, la définition de certaines tâches à réaliser ou questions à étudier, dans des changements significatifs dans l'aménagement du milieu, ainsi qu'à travers certains gestes d'institutionnalisation. Dans les grains plus fin (micro, mais parfois aussi méso), ces enjeux résultent plus souvent d'une co-définition des situations d'apprentissage avec les élèves. Ainsi, plus on descend dans les niveaux fins d'organisation de l'action, plus on a accès à la manière dont les élèves interagissent avec les objets du milieu et leur donnent du sens. Ces différents éléments sont considérés comme traces de l'adaptation du système à la contrainte qui lui est appliquée (greffe).

L'entrée par l'échelle macroscopique et le passage à l'analyse mésoscopique sont particulièrement détaillés dans les résultats qui vont suivre.

Premiers résultats

Analyse macroscopique : mise en perspective des séquences d'Aurélié (France) et Nino (SR)

La comparaison des synopsis de séquence de la phase exploratoire et de la phase expérimentale nous donne accès aux modifications en termes d'organisation de la séquence que provoque la greffe. D'après les synopsis de séquence, on peut en effet comparer les enjeux de niveau N, s'ils sont maintenus ou modifiés, si de nouveaux enjeux apparaissent avec la greffe, si leur durée et leur ordre change.

Commençons par l'exemple d'Aurélié, enseignante d'un collège Réseau éducation prioritaire de Montpellier.

Phase 1		Phase 2	
Enjeux de la séquence (N+1)	Enjeux N	Enjeux de la séquence (N+1)	Enjeux N
Modélisation de la transformation chimique par la réaction chimique et étude des concepts associés (équation de réaction et principe de conservation)	Définition de la transformation chimique et de l'équation de réaction, distinction des transformation chimique, transformation physique et mélange N1 <i>Séances 1-2 [48min40]</i>	Etude des transformations chimiques impliquées dans le cycle du carbone : introduction modèle de la réaction chimique et des concepts associés (équation de réaction et principe de conservation)	Présentation du cycle du carbone holocène et réflexion sur l'origine du dioxyde de carbone atmosphérique N1 <i>Séance 1 [7min30]</i>
	Etude qualitative de la réaction du bicarbonate de soude avec l'acide acétique : identification d'un changement de substances N2 <i>Séance 2 [14min30]</i>		Définition de la transformation chimique N2 <i>Séances 1 [24min]</i>
	Etude quantitative de la réaction du bicarbonate de soude avec l'acide acétique : principe de conservation de la matière N3 <i>Séances 2 et 3 [50min]</i>		Présentation du cycle du carbone anthropocène et origine anthropique du dioxyde de carbone atmosphérique N3 <i>Séance 1 [5min]</i>
	Etude du cas des combustions (TP réaction de combustion du butane) : illustration des principes introduits précédemment N4 <i>Séance 4 [55min]</i>		Définition de l'équation de réaction chimique N4 <i>Séance 1 [2min]</i>
	Définition de la transformation chimique en comparaison à la transformation physique N5 <i>Séance 1 [8min30]</i>		
	Etude qualitative de la réaction du bicarbonate de soude avec l'acide acétique : identification d'un changement de substance N6 <i>Séances 1 et 2 [28min]</i>		
	Distinction des transformation chimique, transformation physique et mélange N7 <i>Séance 2 [14min]</i>		
	Etude quantitative de la réaction du bicarbonate de soude avec l'acide acétique : principe de conservation de la matière N8 <i>Séance 3 [50min30]</i>		
	Etude du cas des combustions (TP réaction de combustion du butane) : illustration des principes introduits précédemment N9 <i>Séances 4 et 5 [1h 35min]</i>		
	Conclusion sur le cycle du carbone : conséquences des activités humaines sur l'environnement N10 <i>Séance 5 [3min]</i>		

Figure n°3 : comparaison des synopsis de séquence Phase 1 et Phase 2 chez Aurélié

La mise en perspective des enjeux de niveau N en Phase 1 et en Phase 2 montre un grand nombre de modifications de la première séance. Tout d'abord vis-à-vis de leur nombre, passant de 4 en Phase 1 à 10 en Phase 2. En effet, l'enjeu N1 qui dure plus de 48 minutes dans la Phase 1 se retrouve fractionné dans une série d'enjeux plus courts allant de quelques minutes à plusieurs dizaines de minutes (N1, N2, N3, N4, N5 et N7). Lorsqu'on s'intéresse aux intitulés, on constate que des enjeux relatifs au cycle du carbone (N1, N3), viennent s'intercaler entre des enjeux qui visent l'apprentissages de savoirs spécifiques (N2, N4, N5, N7). En revanche, les enjeux N2 et N3 de la Phase 1, se retrouvent à l'identique en Phase 2 (N6 et N8), sans lien visible, à cette échelle d'analyse, avec le cycle du carbone. Enfin, on retrouve un enjeu relatif à l'étude de la combustion du butane en fin de séquence

en Phase 1 (N4), également présent en Phase 2 (N9) et directement suivi d'un enjeu (N10) relatif aux conséquences des activités humaines sur l'environnement.

Chez Nino, enseignant au cycle d'orientation dans l'agglomération de Genève, la restructuration en Phase 2 est différente.

Phase 1		Phase 2	
Enjeux de la séquence (N+1)	Enjeux N	Enjeux de la séquence (N+1)	Enjeux N
Modélisation de la transformation chimique par les réactions chimiques et étude des concepts associés (équation, réactif, produit)	Etude de la réaction d'électrolyse de l'eau : approche macroscopique puis modélisation microscopique, définition de réaction, réactif et produit N1 <i>Séance 1 [31min]</i>	Modélisation de la transformation chimique par les réactions chimiques et étude des concepts associés (équation, réactif, produit)	Présentation des objectifs du chapitre N1 <i>Séance 1 [1min45]</i>
	Etude de la réaction de combustion du butane : application du concept de réaction chimique N2 <i>Séance 1 [5min]</i>		Etude de la réaction d'électrolyse de l'eau : définition de la transformation chimique N2 <i>Séance 1 [27min]</i>
	Ecriture et équilibre d'équations de réaction N3 <i>Séance 2 [36min]</i>		Modélisation microscopique de l'électrolyse de l'eau : écriture et équilibre de l'équation de réaction N3 <i>Séance 2 [1h]</i>
	Etude expérimentale de réactions de combustions (carbone, butane dihydrogène et fer) : application des concepts de réactifs et produit, écriture de l'équation de réaction et principe de conservation de la masse N4 <i>Séances 2 et 3 [1h51]</i>		Etude du cas de combustion du fer : mise en évidence de la conservation de la masse au cours de réaction N4 <i>Séance 2 [13min40]</i>
	Retour sur la combustion incomplète du méthane : prévention de l'intoxication au monoxyde de carbone N5 <i>Séance 3 [8min20]</i>		Etudes de combustions en jeu dans le cycle du carbone : écriture d'équations de réaction et lien avec les questions environnementales N5 <i>Séance 3 [1h07min20]</i>
			Etude des cas de combustion du dihydrogène et du butane : mise en relation des niveaux de modèle macroscopique et microscopique N6 <i>Séance 3 [21min]</i>

Figure n°4 : comparaison des synopsis de séquence Phase 1 et Phase 2 chez Nino

En effet, nous pouvons voir que le nombre d'enjeux de niveau N n'est pas drastiquement augmenté (5 en Phase 1, 6 en Phase 2). C'est plutôt au niveau de l'organisation de ces enjeux que l'on observe des modifications. On voit d'abord apparaître en Phase 2, un enjeu N1 relatif à la présentation des objectifs du chapitre. Comme si le besoin d'explicitier les attentes se faisait sentir avec l'introduction du cycle du carbone. De même que l'enjeu N5 de la Phase 1 concernant la prévention de l'intoxication au monoxyde de carbone disparaît en Phase 2. Cependant, on voit apparaître dans l'enjeu N5 de la Phase 2, la mention des questions environnementales. L'étude de la réaction d'électrolyse de l'eau reste la réaction privilégiée pour présenter les concepts et modèles spécifiques de la chimie. On la retrouve en Phase 1 (N1 et N3) ainsi qu'en Phase 2 (N2 et N3). Suivent l'étude d'un ensemble de réactions de combustions, qui ont pour fonction d'illustrer les concepts/modèles précédemment introduits (combustions du butane, du carbone, du dihydrogène, photosynthèse, respiration animale et végétale) ou de compléter le modèle (cas de la combustion du fer qui introduit le principe de conservation de la masse). La différence principale que nous pouvons observer entre les Phases 1 et 2 réside dans l'organisation de ces différents enjeux. En Phase 1, en effet, Nino alterne entre des enjeux relatifs à la définition des concepts/modèles (N1, N3) et application par étude de réactions (N2, N4, N5). En Phase 2, en revanche on remarque un regroupement des enjeux relatifs aux savoirs théoriques au début de la séquence (N1, N2, N3, N4), puis l'application de ces concepts/modèles pour l'étude des combustions en jeu dans le cycle du carbone.

Chez Aurélie, comme chez Nino, le cycle du carbone joue le rôle de greffe en venant bousculer l'organisation ordinaire du système didactique. Nous relevons dans les séquences de ces deux enseignant·e·s, l'apparition d'enjeux relatifs aux conséquences des activités humaines sur l'environnement. Le potentiel de l'objet « cycle du carbone » pour mettre en relation enseignement de savoirs spécifiques à la chimie et étude d'une question complexe semble se confirmer ici, à l'échelle de l'analyse macroscopique. De plus, on observe une restructuration du début de la séquence, avec des enjeux tournés vers la définition des concepts/modèles spécifiques – dont le nombre augmente significativement chez Aurélie. L'étude des combustions mises en jeu dans le cycle du carbone font l'objet de la deuxième partie de la séquence, comme si la définition théorique des savoirs était un préalable nécessaire à la compréhension de questions plus complexes.

Ces constats nous amènent à identifier des moments de rupture entre Phase 1 et Phase 2, qu'il faut maintenant analyser à un grain plus fin. La partie qui suit rend compte d'extrait de l'analyse mésoscopique du cas de Nino. Nous étudions en particulier l'évolution de la fonction du modèle de la réaction chimique, en lien avec l'insertion de la greffe, élément précurseur du fonctionnement du contrat didactique pensé par Nino.

Analyse mésoscopique : étude de l'évolution de la fonction du modèle chez Nino après l'insertion de la greffe

Pour saisir l'évolution de la fonction du modèle de la réaction chimique, en lien avec la greffe, nous avons repéré deux moments distincts de la Phase 2, au niveau de l'enjeu N3 « Modélisation microscopique de l'électrolyse de l'eau : écriture et équilibre de l'équation de réaction » et de l'enjeu N5 « Etudes de combustions en jeu dans le cycle du carbone : écriture de l'équation de réaction et lien avec les questions environnementales » où les attentes de Nino vis-à-vis du modèle de la réaction chimique ne sont pas les mêmes.

Comme nous l'avons détaillé dans la partie précédente, l'enjeu N3 se situe dans la première partie de la séquence consacrée à l'introduction des concepts et modèles, au moment de la séance 2. Les sous-enjeux (N-1) de cette séance et les phases de l'action qui les constituent, confirment le caractère spécifique de cet enjeu : il s'agit de modéliser, au niveau macroscopique, puis au niveau microscopique, la transformation réalisée expérimentalement. Pour cela, Nino introduit progressivement les concepts de conservation des atomes et d'équation de réaction chimique, l'objectif étant *in fine* d'équilibrer cette équation. Mais l'enjeu ne semble pas se limiter à un exercice d'ajustement d'équation, en effet, les éléments de discours relevés dans la dernière colonne du synopsis de séance indiquent que Nino explicite la nécessité du modèle microscopique qui vient d'être établi,

pour interpréter le phénomène que les élèves ont vu au cours de l'expérience : la formation de deux volumes de gaz différents (phase de l'action N31d).

Classe de Nino - 11 ^{ème} LS - séance du 27 mai 2022 Chapitre Matière et transformations : séance 2			
Enjeux de niveau N (visées de l'ENS qui oriente l'action globalement)	Enjeux ou tâches de niveau N-1	Phases de l'action (étapes ou organisation pour atteindre l'enjeu)	Micro-Événements liés aux objets (significations émergentes du côté de ENS ou Els)
Modélisation microscopique de l'électrolyse de l'eau : écriture et équilibre de l'équation de réaction N3 [1h]	Modélisation microscopique de la réaction d'électrolyse de l'eau N31 [13 :40 à 35 :43/ TdP 1 à 140]	Mise en relation de la transformation chimique (macro) et du modèle de la réaction chimique (micro) N31d [21 :11 à 25 :36/ TdP 87 à 125]	<p>Ens TdP87 : vous vous souvenez en fait que dans les cuves ça descendait pas tout à fait de la même façon</p> <p>Ens TdP95 : bon↓ / en l'occurrence dans quel de quel côté vous aviez l'hydrogène</p> <p>Ens TdP99 : ben regardez ici (<i>pointe l'équation écrite sur la table</i>) / regardez ici de quel côté vous avez le plus combien de fois plus↑ El2 combien de fois plus↑</p> <p>El-Al TdP100: heu deux fois</p> <p>El-En TdP109 : le truc c'est que on a un seul Lego rouge et deux Lego bleus pourquoi là y'en a deux de rouges (<i>pointe la molécule de o2</i>)</p> <p>Ens TdP114: si j'avais qu'une molécule comme ceci (<i>h2o</i>) j'aurais de la peine à former ça (<i>pointe les produits</i>) tu y arriverais pas↓ et puis avoir une molécule c'est difficile j'vous le dis / donc tu vois↑ ça c'est qu'une question d'équilibre / je sais que si je prends toutes si je prends 1 litre d'eau alors je hum je peux prendre 1 litre et demi d'eau je sais qu'avec ce 1 litre et demi d'eau je vais former 1 litre de h2 pardon (<i>remet les Lego sur la table pour équilibrer l'équation</i>) et un demi litre de o2↓</p> <p>Ens TdP119 : c'est qu'une question de volume mais là on est au niveau moléculaire là vous avez une explication alors l'idée El-Am vient de le faire elle vient d'équilibrer en fait une équation au niveau moléculaire / mais de quelques chose qu'elle observe au niveau macroscopique</p> <p>Ens TdP125 : oui mais celui-ci en réalité (<i>molécule de o2</i>) dans dans le réservoir d'eau c'est pas vrai y'a pas qu'une molécule d'accord y'en a des milliards et des milliards et des milliards d'accord mais c'est clair que pour former ça pour que ce soit équilibré vous avez cette équation-là</p> <p>mais là on est au niveau clairement on est au niveau microscopique au niveau de la molécule au niveau de l'équation / c'est beau quoi /</p>

Figure n°5 : extrait de synopsis de la séance 2 Phase 2 chez Nino

L'enjeu N5 quant à lui, se retrouve dans la séance 3. Comme nous l'avons décrit, après introduction des concepts/modèles à partir de l'étude de l'électrolyse de l'eau et de la combustion du fer au cours des deux séances précédentes, la séance 3 est l'occasion d'appliquer ces concepts/modèle à l'étude des combustions en jeu dans le cycle du carbone. Le cycle du carbone est tout d'abord introduit et la question du réchauffement climatique dû à l'accumulation de l'élément carbone dans le compartiment atmosphère est soulevée (N52). Le schéma du cycle, sert ensuite de point de départ pour l'étude d'un ensemble de combustions, correspondant aux différentes flèches : carbone (N53) et méthane (N54). A chaque fois, Nino réalise la démonstration de l'expérience de combustion (vidéo pour le butane), les produits sont identifiés macroscopiquement, puis la transformation est modélisée microscopiquement, l'équation de réaction est rédigée puis équilibrée et reportée sur le schéma du cycle. Sont ensuite traitées les réactions en jeu dans les phénomènes de respirations animale et végétale et photosynthèse (N55). La phase de l'action N55d nous indique un retour au cycle du carbone dans son ensemble, après le traitement individuel des différentes flèches à la lumière du modèle de la réaction chimique, ainsi que la présence d'une conclusion sur les conséquences des combustions d'origine anthropique sur le climat. Les éléments présents dans la dernière colonne du synopsis de séance, nous révèlent des éléments nouveaux concernant la fonction du modèle de la réaction chimique. En effet, le report des équations de chaque réaction étudiée sur les flèches du cycle fait le lien avec le principe de conservation de la matière. Nino explicite cela en pointant tous les compartiments du cycle où se trouvent l'élément carbone et demande aux élèves quel problème peut poser l'accumulation de l'élément carbone sous la forme dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Ici, l'enjeu est donc de mobiliser les modèles construits et éprouvés en séances 1 et 2 pour la compréhension d'une questions complexe telle que l'origine

anthropique du réchauffement climatique. On observe alors une évolution des enjeux liés à la transformation chimique et à sa modélisation par la réaction chimique, par rapport à la Phase 1, en l'absence de la greffe.

Classe de Nino - 11 ^{ème} LS - séance du 27 mai 2022 Chapitre Matière et transformations : séance 3			
Enjeux de niveau N (visées de l'ENS qui oriente l'action globalement)	Enjeux ou tâches de niveau N-1	Phases de l'action (étapes ou organisation pour atteindre l'enjeu)	Micro-Evénements liés aux objets (significations émergentes du côté de ENS ou Els)
Etudes de combustions en jeu dans le cycle du carbone : écriture de l'équation de réaction et lien avec les questions environnementales N5 [1h07min20]	Etude des réactions de combustion de respiration et photosynthèse N55 [54 :10 à 01 :09 :30 / 268 à 429]	Mise en relation des modèles du cycle du carbone et de la réaction chimique : lien avec les questions environnementales N55c [01 :03 :00 à 01 :09 :30/ 400 à 429]	Ens TdP405 : ici vous avez c'qu'on appelle le cycle du carbone donc de l'atome de C vous voyez que le C vous en avez ici au départ (montre la lithosphère) là aussi avec le pétrole vous avez aussi le C qui est ici (montre l'atmosphère) le C qui est ici (montre la formule de la photosynthèse) le C qui va p't'être récupéré ↓ d'accord ↑ maintenant ce qui m'intéresse c'est la chose suivante ↓ / le problème c'est que vous l'avez soulevé avant c'est qu'on produit énormément de ce gaz carbonique ok ↑ de plus en plus ok le problème c'est que ici vous avez ces végétaux qui ont de plus en plus de peine à le récupérer Ens TdP409 : donc c'est effectivement si vous commencez à brûler ces forêts-là ben vous les placez ici (montre la flèche correspondant à la combustion liée à la déforestation) puis elles produisent ↓

Figure n°6 : extrait de synopsis de la séance 3 Phase 2 chez Nino

Conclusion

Au début de cette communication, nous avons mis en évidence le potentiel du concept de transformation chimique pour entrer dans la complexité d'une question environnementale en classe de chimie au secondaire I. Mais aussi la tension qui persiste entre enseignement de savoirs conceptuels nécessaires à la formation de la relève scientifique et transmission d'une CST utile à la formation des citoyen·es. Tension renforcée par le manque de ressources disponibles pour l'enseignement de questions complexes en classe de chimie au niveau étudié.

Notre étude des éléments précurseurs du contrat didactique, outillée par la proposition d'une greffe sous la forme d'une représentation du cycle du carbone chez deux enseignant·e·s, français·e·s et suisse-romand·e·s, montre une modification des enjeux d'enseignement-apprentissage associés au concept de transformation chimique. Ces modifications vont dans le sens d'une mobilisation du concept spécifique vers l'étude de la question complexe posée par le cycle du carbone : l'origine anthropique du réchauffement climatique. Par des aménagements dans l'organisation des enjeux de leurs séquences respectives, les enseignant·e·s observé·e·s tentent de concilier un enjeu d'apprentissage principal relatif à la modélisation des phénomènes via le modèle microscopique de la réaction chimique et un enjeu secondaire, relatif à la compréhension des conséquences des activités humaines sur l'environnement. Après étude du cas de Nino, nous formulons l'hypothèse selon laquelle la définition des concepts/modèles disciplinaires seraient un

préalable indispensable à leur application pour l'étude de questions plus globales, demandant une approche complexe.

Ces premiers résultats, obtenus aux échelles d'analyse macroscopique et mésoscopique, demandent d'être approfondis par l'étude d'événements significatifs repérés à l'échelle microscopique, qui nous permettront de caractériser finement l'articulation contrat/milieu et le rôle de chacun des sujets dans ce processus d'enseignement-apprentissage particulier.

Références bibliographiques

- Chevallard, Y. (1985). *La transposition didactique. Du savoir savant au savoir enseigné*. La Pensée Sauvage éditions.
- Chevallard, Y. (1992). Concepts fondamentaux de la didactique : perspectives apportées par une approche anthropologique. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 12(1), 73–112. <https://revue-rdm.com/1992/concepts-fondamentaux-de-la-didactique/>
- Kermen, I. (2018). *Enseigner l'évolution des systèmes chimiques au lycée*. Presses Universitaires de Rennes.
- Ligozat, F. (2008). *Un point de vue de didactique comparée sur la classe de mathématiques : étude de l'action conjointe du professeur et des élèves à propos de l'enseignement, apprentissage de la mesure des grandeurs dans des classes françaises et suisses romandes* [thèse de doctorat, Université Aix-Marseille 1 et Université de Genève].
- Marty, L. (2019). *Continuité de l'expérience d'apprentissage et transposition didactique des savoirs dans l'enseignement de la physique Comparaison internationale dans le cas des propriétés de la matière* [thèse de doctorat, Université de Genève et Université de Toulouse Jean Jaurès]. HAL. <https://theses.hal.science/tel-02928977/>
- Morin, E. (1982). *Science avec conscience*. Fayard.
- Schubauer-Leoni, M.-L., et Leutenegger, F. (2002). Expliquer et comprendre dans une approche clinique/expérimentale du didactique ordinaire. Dans M. Saada-Robert et F. Leutenegger (dir.), *Expliquer et comprendre en sciences de l'éducation*, (pp. 227-251). DeBoeck Université.
- Sensevy, G. et Mercier, A. (2007). *Agir ensemble. L'action conjointe du professeur et des élèves dans le système didactique*. Presses universitaires de Rennes.
- Sudriès, M., Ligozat, F. et Cross, D. (sous presse). Les enjeux de l'enseignement-apprentissage de la transformation chimique au secondaire I : regards croisés sur les textes curriculaires en Suisse romande et en France. *Revue suisse des sciences de l'éducation*.
- Tiberghien, A., Malkoun, L. et Seck, M. (2008). Analyse des pratiques de classes de physique : aspects théoriques et méthodologiques. *Les Dossiers des sciences de l'éducation*, 19, 61-79.

Tiberghien, A. et Sensevy, G. (2012). The nature of video studies in science education. Dans D. Jorde et J. Dillon (dir.), *Science Education Research and Practice in Europe* (pp. 141–179). Sense Publishers.