

# Analyse praxéologique de la modélisation de l'évolution temporelle d'un système chimique : étude de cas en classe de terminale

KAOUTHER RASSAA<sup>1</sup>, AMAL MAY<sup>2</sup>

*<sup>1</sup>Laboratoire de Physique de la matière condensée  
Faculté des Sciences de Tunis  
Université de Tunis El Manar  
kaouther.rassaa@fst.utm.tn*

*<sup>2</sup>Institut Supérieure de l'Éducation et de la Formation Continue  
Tunisie  
amel.didactique2017@gmail.com*

## ABSTRACT

*This article raises the question of how a Tunisian secondary school teacher models, at the level of the final class (grade 13), the temporal evolution of a chemical system and the reasons they give to justify their choices. This work is part of the anthropological theory of didactics. The analysis of the statements of the teacher interviewed highlights the absence of a unifying model for all the kinetic phenomena studied and a relative lack of interest in the microscopic modeling of temporal evolution of a chemical system. Behind these choices lies a set of theoretically unfounded convictions and beliefs.*

## KEYWORDS

*Anthropological theory of didactics, Praxeologies, Chemical kinetics, Modeling*

## RÉSUMÉ

*Cet article pose la question de la manière dont un enseignant du secondaire tunisien modélise, au niveau de la classe terminale (grade 13), l'évolution temporelle d'un système chimique et les raisons qu'il donne pour justifier ses choix. Ce travail s'inscrit dans le cadre de la théorie anthropologique de la didactique. L'analyse, outillée de la notion de praxéologie, des déclarations de l'enseignant interviewé met en évidence l'absence d'un modèle unificateur pour l'ensemble des phénomènes cinétiques étudiés et un désintérêt relatif à la modélisation microscopique de l'évolution temporelle d'un système chimique. Derrière ces choix réside un ensemble de convictions et de croyances non fondées théoriquement.*

## MOTS-CLÉS

*Théorie anthropologique de la didactique, Praxéologies, Cinétique chimique, Modélisation*

## INTRODUCTION

La cinétique chimique est enseignée au lycée au niveau de la terminale dans le programme de physique-chimie. Ce domaine de la chimie s'emploie à comprendre comment interviennent qualitativement et quantitativement des grandeurs macroscopiques (concentration, température...) sur la vitesse de la réaction en développant des lois cinétiques expérimentales,

mais également à reconstituer les étapes réactionnelles qui décrivent les modifications subies à l'échelle microscopique par les entités chimiques au cours d'une transformation (Justi & Gilbert, 1999). Il offre donc un triple regard macroscopique, microscopique et symbolique sur l'évolution au cours du temps de la transformation chimique (Fahmy, 2016; Johnstone 1991; Kermen, 2018; Taber, 2013). Partant de ce fait, la circulation entre ces trois niveaux de modélisation devrait constituer un enjeu fondamental de l'enseignement de la cinétique chimique (Johnstone, 2000). Or, de nombreuses études indiquent que cet enjeu semble buter sur des obstacles.

D'une part, les élèves éprouvent des difficultés pour passer du comportement macroscopique observable à la modélisation microscopique (Bain & Towns, 2016; Bongers et al., 2019; Kermen, 2018). Plusieurs auteurs indiquent que les apprenants ont du mal à relier la vitesse de la réaction à la fréquence des chocs efficaces entre entités chimiques (Bektasli & Çakmakci, 2011; Çakmakci et al., 2006), à expliquer à l'échelle microscopique l'influence des facteurs cinétiques sur cette vitesse (Çakmakci et al., 2006; Kolomuç & Tekin, 2011; Kurt & Ayas, 2012; Turanyi & Toth, 2013) et à appréhender le mécanisme par lequel les catalyseurs fonctionnent (Bain et al., 2018; Wolfson et al., 2014).

D'autre part, les enseignants ne semblent pas avoir conscience de l'importance de la distinction et l'établissement de liens forts entre les trois niveaux de l'« espace du savoir en chimie » dans leurs pratiques éducatives (De Jong & Van Driel, 2004; Kermen & Méheut, 2008). En Tunisie, Dumon et Mzoughi-Khadraoui (2014) et Ben Kilani (2019) montrent, de façon générale, que les enseignants accordent peu d'attention à la modélisation de la transformation chimique à l'échelle microscopique. Au Brésil, Justi et Gilbert (1999) constatent que les modèles relatifs à la cinétique chimique utilisés par les enseignants sont peu pertinents pour l'apprentissage. Talanquer (2011) affirme que certains futurs enseignants ne sont pas conscients de l'existence de trois niveaux dans l'« espace du savoir en chimie ». Li et Arshad (2014), en analysant les pratiques des enseignants malaisiens relatives aux réactions d'oxydoréduction, constatent que ces derniers mettaient davantage l'accent sur le niveau macroscopique que sur les niveaux microscopique et symbolique.

Ces constats nous amènent à nous interroger sur la manière dont les enseignants Tunisiens interprètent les phénomènes cinétiques et abordent la modélisation de l'évolution temporelle d'un système chimique aux deux échelles, macroscopique et microscopique, et quelles sont les raisons qu'ils donnent pour justifier leurs choix ?

Dans cette perspective le cadre théorique de la théorie anthropologique du didactique (TAD) (Chevallard, 1989) peut être mis à profit puisqu'il permet de rendre compte des phénomènes de la réalité sociale où les savoirs/connaissances vivent et se diffusent,

## CADRE THÉORIQUE

Dans la TAD, un objet de savoir n'existe pour un sujet que s'il y a eu rapport avec cet objet. Le recours à la notion « rapport personnel » permet de décrire le système de toutes les interactions que le sujet peut avoir avec l'objet. Or, l'existence d'un objet de savoir est nécessairement rattachée aux institutions dans lesquelles il prend place « *un savoir n'existe pas in vacuo, dans un vide social : tout savoir apparaît, à un moment donné, dans une société donnée, comme ancré dans une ou des institutions* » (Chevallard, 1989, p. 215). Dans cette perspective, le rapport personnel à l'objet de savoir est tributaire de la manière dont les institutions sociales le mettent en jeu. Ce qui se fait, dans une institution avec un objet on l'appelle rapport institutionnel (Chevallard, 1989, p. 213). On dira qu'un individu est un bon sujet dans une institution en une position donnée si son rapport institutionnel dans cette position est conforme à son rapport personnel.

Dans cette approche théorique, la notion de « *praxéologie* » est mobilisée pour décrire ces différents rapports au savoir. Cette notion permet de décrire « *toute structure de connaissance et d'action possible* » (Ladage, 2016, p. 3) sous la forme de l'association de deux blocs. Le premier est le bloc *praxique*, il correspond « *à peu près à ce que, dans la langue courante, on nomme un savoir-faire* » (Chevallard, 2017, p. 34). Ce bloc regroupe une tâche ou un type de tâches à réaliser et des techniques permettant de les accomplir. La tâche renvoie selon Chevallard (1997, p. 23) à un système « d'activités relativement bien circonscrites, qui se découpent dans le flux de la pratique ». Elle est généralement décrite à l'aide de verbes d'action. Les techniques sont selon Chaachoua (2010) décrites « sous forme d'actions plus ou moins structurées », ou décomposées en « sous-tâches ». Le second bloc est celui du logos (ou savoir) qui inclue la technologie et la théorie. La technologie renvoie à un « discours raisonné » à propos d'une technique qui a pour but de l'expliquer, de la rendre intelligible voire de la produire. La théorie désigne un discours sur le discours technologique donc un niveau de justification supplémentaire.

Pour illustrer ces quatre composants praxéologiques, prenons un exemple simple cité par Comiti (2014) : dans l'institution « enseignement des maths au collège en France » la technique utilisée pour le type de tâches « vérifier que le nombre  $a$  est solution d'une équation donnée », est décrite par les sous-tâches : remplacer  $x$  par  $a$  dans l'équation, effectuer les calculs et vérifier que les deux membres de l'équation sont bien égaux. La technologie qui permet de justifier cette technique repose sur la définition de la solution d'une équation et la théorie sous-jacente est celle de l'ensemble des réels  $\mathbb{R}$ .

L'étude des praxéologies dans le cadre de la didactique permet de « modéliser les pratiques d'un enseignant dans une institution [...], en prenant en compte simultanément ce qui fonde et/ou légitime cette action » (Pélissier & Venturini, 2016, p. 73). Pour rendre compte de l'activité des enseignants deux cas de praxéologies sont envisageables. La première nommée praxéologie disciplinaire, décrit les savoirs scientifiques que les enseignants s'attachent à faire construire dans la classe. La praxéologie didactique porte sur la manière dont un enseignant introduit les savoirs en classe. Elle dépend selon Bosch et Gascón (2002, p. 24) « de ses assujettissements aux diverses institutions qu'il aura parcourues, ce qui lui confère sans doute une individualité ou une unité particulière ».

L'ensemble des praxéologies qu'une personne ou une institution possède et met en œuvre correspond en TAD à son équipement praxéologique (Chevallard, 2007).

### **Problématique**

L'enseignement de la modélisation de l'évolution temporelle d'un système chimique à l'échelle microscopique est problématique. D'une part, cet objet de savoir n'est associé à aucune recommandation dans le programme officiel Tunisien (Ministère de l'Éducation, 2009). D'autre part, le manuel scolaire officiel (Centre National Pédagogique, 2010) mis à la disposition des enseignants et des élèves par le ministère de l'éducation et de la formation présente une modélisation à l'échelle microscopique de tous les phénomènes cinétiques étudiés. On peut supposer à la suite de Neyret (1995) que le manuel, bien qu'il soit sans obligation d'utilisation, constitue une traduction des directives institutionnelles selon l'interprétation de ses auteurs. Il peut donc compléter les instructions du programme officiel sur certains objets de savoir. Cependant, la lecture des sujets donnés à l'épreuve de baccalauréat depuis 2008, date à laquelle la cinétique chimique a fait son apparition dans l'enseignement de la Chimie en Tunisie, montre que la modélisation de l'évolution temporelle d'un système chimique à l'échelle microscopique ne figure dans le contenu d'aucune épreuve. Ceci nous amène à dire que les prescriptions institutionnelles relatives à cet objet de savoir sont ambiguës et nous conduit à explorer l'équipement praxéologique existant des enseignants.

À partir de là, une question spécifique se dessine : Quelles sont les praxéologies qui permettent de décrire le rapport personnel des enseignants à la modélisation de l'évolution temporelle d'un système chimique au sein d'une institution (l'enseignement Tunisien de la Chimie dans le secondaire) dont les prescriptions peuvent constituer une source de tensions.

## MÉTHODOLOGIE

### *Recueil et traitement des données*

Cette recherche est une partie d'un projet de thèse de doctorat qui vise à repérer les réactions des enseignants à propos de l'enseignement actuel de la cinétique chimique. Nous avons donc fait le choix d'étudier les pratiques déclaratives des enseignants afin de mieux comprendre leur logique d'action.

Le recueil de données s'organise donc autour d'un entretien semi-directif enregistré (audio) puis intégralement retranscrit. La technique de l'entretien semi-directif a été mobilisée parce qu'elle laisse une grande place à l'expression de la parole du sujet.

L'enseignant que nous avons interviewé présente une ancienneté de métier importante (plus de 25 ans d'ancienneté et plus de 10 ans d'enseignement de la classe terminale). Il exerce dans un lycée public du centre de Tunis supposé recruter de bons élèves.

L'entretien est articulé autour de deux questions : Comment vous avez fait pour enseigner un tel objet de savoir dans votre classe ? Pourquoi avez-vous fait ce choix ?

Les objets de savoir sur lesquels nous avons questionné l'enseignant correspondent aux phénomènes cinétiques que le programme officiel impose de les modéliser :

- Transformations chimiques lentes et rapides ;
- Action de la température et des concentrations des réactifs sur la durée d'une transformation chimique ;
- Action d'un catalyseur sur la durée d'une transformation chimique.

Les éléments praxéologiques sont tirés des réponses aux questions suivantes :

**TABLEAU 1**  
*Identification des éléments constitutifs des praxéologies*

<b>Praxéologie</b>	<b>Tâche</b>	<b>Technique</b>	<b>Logos</b>
Disciplinaire	Que doit faire l'élève ?	Quelles sont les outils et les moyens utilisés ?	Quel savoir la tâche et la technique permettent de construire ?
Didactique	Que doit faire l'enseignant pour amener les élèves à réaliser la tâche ?	Quelles sont les outils et les moyens utilisés ?	Pourquoi accomplir ce type de tâches de cette manière ?

Comme nous n'avons pas identifiés dans les propos des enseignants des éléments appartenant à la catégorie théorie, nous faisons le choix de présenter une praxéologie en trois colonnes.

## RÉSULTATS DE L'ANALYSE PRAXÉOLOGIQUE

### *La lenteur d'une transformation chimique (TC)*

Selon cet enseignant les élèves doivent commencer par réaliser en binôme une série d'expériences. Afin que les élèves prennent conscience de la nécessité d'une durée non négligeable pour la mise en œuvre d'un suivi cinétique d'une transformation chimique, il leur demande « *de mesurer le temps qu'ils mettent pour la mise en œuvre d'un suivi cinétique* ». Au regard de ces mesures, les élèves repèrent les transformations chimiques pouvant faire l'objet d'un suivi cinétique et concluent qu'une transformation chimique lente est celle qu'on peut suivre son évolution à l'œil nu ou avec les techniques de mesure habituelles. Pour justifier le choix de ne pas aborder en classe les raisons de la lenteur d'une transformation chimique en terme de chocs efficaces, il déclare que ce problème est sans intérêt pour les élèves « *Je pense que pour les élèves il est plus important de réaliser des expériences que de comprendre les raisons de la lenteur d'une Transformation chimique. Faire de la Chimie c'est faire des expériences* ».

**TABLEAU 2**

*Praxéologie disciplinaire et didactique relative à la lenteur d'une transformation chimique*

<b>Praxéologie</b>	<b>Tâche</b>	<b>Technique</b>	<b>Logos</b>
Disciplinaire	Distinguer expérimentalement les TC lentes et rapides.	Suivre le protocole expérimental donné. Comparer la durée de la mise en œuvre d'un suivi cinétique et la durée de la TC.	TC lente si elle se déroule sur des durées permettant un suivi aisé avec nos sens ou avec les techniques de mesure habituelles.
Didactique	Amener les élèves à établir un critère pour différencier les TC lentes et rapides.	Institutionnaliser les observations expérimentales. Eviter de questionner les raisons de lenteur d'une TC.	La Chimie est avant tout une science expérimentale.

### *Effet de la variation des concentrations des réactifs [R] ou de la Température T°C*

Pour aborder cette partie « *les élèves doivent effectuer le suivi cinétique de la transformation chimique étudiée pour différentes température ou concentrations des réactifs en respectant rigoureusement le protocole expérimental donné* ». Pour cela « *je leur demande de tracer une courbe décrivant l'évolution de l'avancement de la réaction au cours du temps et de déterminer le coefficient directeur de la tangente à l'origine de cette courbe et déduire la vitesse de la réaction* ». L'enseignant ajoute que l'exploitation de ces résultats va permettre aux élèves l'établissement d'une relation qualitative entre la température ou les concentrations et la vitesse de la réaction. Il signale cependant, qu'il aurait préféré que l'étude expérimentale de l'évolution temporelle des systèmes chimiques soit « *coroner par l'établissement des lois de vitesses. Malheureusement le programme officiel (PO) ne nous autorise pas à le faire* ».

Pour expliquer à l'échelle microscopique l'influence de ces deux facteurs sur la vitesse de la réaction l'enseignant déclare « *tant que l'on ne dispose pas de logiciel de simulation permettant de représenter à l'échelle microscopique l'aspect dynamique des systèmes chimiques je me limite à décrire par des schémas dessinés au tableau les modifications du*

*comportement des entités chimiques* ». Il ajoute : « *cette partie du programme officiel n'a aucun intérêt pour les élèves puisqu'elle ne figure pas dans les épreuves du baccalauréat* ».

**TABLEAU 3**

*Praxéologie disciplinaire et didactique relative à l'influence des concentrations des réactifs et de la température*

Praxéologie	Tâche	Technique	Logos
Disciplinaire	Dégager expérimentalement une relation entre la variation de la vitesse et la variation de la T°C ou des [R].	Effectuer le suivi cinétique d'une TC en variant soit la T°C soit les [R]. Déterminer graphiquement les vitesses de la réaction. Identifier l'influence de la T°C ou des [R] sur les vitesses.	La vitesse d'une réaction croît quand la T°C ou les [R] croient
Didactique	Amener les élèves à établir une relation qualitative entre la vitesse et la T°C ou la [R].	Etayer les activités expérimentales des élèves. Mettre en commun les observations expérimentales puis aider les élèves à établir des liens entre ces observations et des éléments théoriques. Etablir des lois des vitesses devrait être une compétence exigible.	Importance de la rigueur expérimentale. Conforme au P.O mais l'établissement d'un modèle mathématique serait préférable.
	Amener les élèves à interpréter les observations expérimentales en considérant les chocs efficaces entre les entités chimiques.	Relier la vitesse à la fréquence des chocs efficaces entre entités. Illustrer par des schémas dessinés au tableau (absence d'un logiciel de simulation) Encourager l'établissement des liens entre les observations expérimentales et les prévisions théoriques.	Conforme au P.O mais sans intérêt Nécessité de transmettre que les contenus sujets à une évaluation au baccalauréat.

### ***Effet de l'ajout d'un catalyseur***

Selon ces déclarations l'enseignant aborde la présentation de l'effet d'un catalyseur par la mise en évidence expérimentale de l'augmentation de la vitesse de la réaction en présence du catalyseur à travers le suivi cinétique de la transformation chimique étudiée. Il prend à sa charge la mise en évidence expérimentale de la consommation puis la régénérescence du catalyseur au cours de la transformation chimique. Il demande ensuite aux élèves d'interpréter les observations en termes de réactions chimiques et d'écrire les équations qui modélisent la consommation du catalyseur et sa régénérescence. Dans ce cadre, l'enseignant explique que la modélisation de la catalyse proposée dans le programme officiel présente quelques faiblesses. « *Mettre en évidence l'action du catalyseur via deux transformations chimiques rapides et indépendantes mettant en jeu le catalyseur avec chacun des réactifs pris à part n'est pas*

*acceptable* ». Toutefois, selon l'enseignant, ce choix permet de rendre le rôle du catalyseur perceptible pour les élèves « *seule l'observation d'expériences permet de convaincre les élèves* ».

**TABLEAU 4**

*Praxéologie disciplinaire et didactique relative à la catalyse*

<b>Praxéologie</b>	<b>Tâches</b>	<b>Technique</b>	<b>Logos</b>
Disciplinaire	Mettre en évidence expérimentalement l'action d'un catalyseur	Effectuer le suivi cinétique d'une TC en présence et en absence du catalyseur et comparer les vitesses des réactions. Identifier expérimentalement la présence du catalyseur à la fin de la transformation	Le catalyseur modifie la vitesse de la réaction sans modifier le bilan de la transformation
Didactique	Amener les élèves à percevoir le rôle du catalyseur.	Remplacer la « réaction » lente par des « réactions » rapides de même bilan où le catalyseur est un réactif pour l'une et un produit.	Conformité au P.O Nécessite de mettre en évidence la consommation du catalyseur puis sa régénérescence.

## DISCUSSION

Dans ce travail nous avons analysé les pratiques déclaratives et les discours sur ces pratiques. Nous nous gardons donc de parler de pratiques « effectives » puisque nous n'avons pas observé ce qui se passe l'intérieur de la classe.

L'analyse du bloc *praxique* des praxéologies disciplinaires montre que lors de la modélisation de l'évolution temporelle d'un système chimique les tâches conduisant à la construction du registre empirique sont assignées aux élèves et les tâches conduisant à la construction du registre théorique sont sous la responsabilité exclusive de l'enseignant. L'établissement des liens entre les deux registres est un travail collectif guidé par l'enseignant.

Le bloc logos des praxéologies disciplinaires révèle que l'itinéraire cognitif proposé aux élèves ne présente pas un modèle interprétatif unificateur pour l'ensemble des phénomènes cinétiques étudiés. La lenteur de la transformation chimique est juste mise en évidence expérimentalement, aucun modèle interprétatif ne lui est associé. Pour rendre compte de l'influence de la température et des concentrations des réactifs sur la vitesse de la réaction un modèle microscopique en terme de chocs efficaces entre les entités chimiques est convoqué. L'explication de la catalyse s'est fondée sur un modèle macroscopique sous forme de deux réactions illustrant l'intervention transitoire du catalyseur dans la transformation. Ces choix interprétatifs peuvent, d'une part, défavoriser l'établissement des liens entre les différents phénomènes cinétiques étudiés et d'autre part, laisser entendre que le modèle microscopique de chocs efficaces n'est fonctionnel que pour l'interprétation des phénomènes cinétiques en relation avec les facteurs température et concentrations des réactifs.

Le bloc pratico-technique des praxéologies didactiques montre qu'une démarche « empiriste » et « inductiviste » (Cariou, 2011) règne sans partage sur les pratiques de cet enseignant. Les techniques didactiques qu'il exploite consistent à conduire les élèves de

l'expérience et l'observation aux éléments théoriques. Cette démarche qui ne permet pas aux élèves d'exprimer leurs opinions, a été souvent dénoncée comme en témoigne Develay (1989), « lorsque la méthode expérimentale ne conduit pas les élèves à émettre des hypothèses, [...] l'apprenant est réduit à un rôle d'exécutant de tâches manuelles et à l'analyse des résultats ».

Le premier constat révélé par les praxéologies didactiques est la confusion dans le discours de cet enseignant entre le contenu du programme officiel est celui du manuel. Nous estimons, vu la grande expérience de l'enseignant interviewé, que cette confusion provient plus d'une croyance sur la complémentarité du contenu du programme et celui du manuel que d'un manque de vigilance terminologique. Ce constat conforte l'hypothèse de travail adoptée par Chaachoua et Comiti (2010) à propos du *rapport institutionnel qui doit être approché par l'analyse des programmes et des manuels*.

Bien que cet enseignant s'attache à respecter les instructions officielles nos analyses montrent un décalage entre son rapport personnel à la modélisation de l'évolution temporelle d'un système chimique et le rapport institutionnel. Il souhaite d'une part, l'introduction dans le programme d'un modèle mathématique décrivant quantitativement l'effet des facteurs cinétiques. D'autre part, il juge sans intérêt pour les élèves l'interprétation à l'échelle microscopique des facteurs cinétiques prescrite dans le programme officiel.

Nous avons également remarqué qu'au niveau du bloc technologico-théorique les justifications reposent dans la plupart des cas, sur des croyances non fondées scientifiquement. L'attachement de l'enseignant à la réalisation d'expériences par les élèves et à la rigueur expérimentale est relié à une conviction personnelle stipulant le primat de la pratique expérimentale dans l'enseignement de la chimie. En arrière-plan de son souhait d'introduire la notion de lois de vitesse dans le programme de la cinétique chimique se trouve une croyance sur la prévalence dans l'enseignement de la Chimie des modèles mathématiques, au détriment des aspects qualitatifs des concepts. Le désintérêt relatif à la modélisation microscopique de l'évolution temporelle d'un système chimique peut être rattaché à un point de vue dans lequel l'enseignement dans une classe d'examen doit se limiter aux notions susceptibles d'être évaluées.

L'absence dans les déclarations de l'enseignant relatives à la modélisation en chimie de justifications fondées, fait écho aux résultats obtenus par Ben Kilani (2019). Cette absence devrait interpeller tant les chercheurs en didactique que les acteurs de l'enseignement de la chimie. Le défi, selon notre point de vue, serait de favoriser la diffusion des savoirs didactiques afin de parvenir à enrichir les fondements théoriques de la modélisation chez les enseignants et de questionner des techniques pédagogiques qui leur soient spécifiques.

Pour conclure, tout en évitant de généraliser, notre étude montre qu'il y a un intérêt à envisager un travail sur les représentations des enseignants à propos de la modélisation de l'évolution temporelle d'un système chimique. Elle invite également à poursuivre l'enquête par l'observation directe de ce qui se déroule en classe.

## RÉFÉRENCES

- Bain, K., & Towns, M. (2016). A review of research on the teaching and learning of chemical kinetics. *Chemistry Education Research and Practice*, 17(2), 246-262.
- Bain, K., Rodriguez, J.-M. G., & Towns, M. H. (2018). Zero-order chemical kinetics as a context to investigate student understanding of catalysts and half-life. *Journal of Chemical Education*, 95, 716-725.
- Bektasli, B., & Çakmakci, G. (2011). Consistency of students' ideas about the concept of rate across different contexts. *Education and Science*, 36(162), 273-287.

- Ben Kilani, C. (2019). Analyse de pratiques ordinaires d'enseignement des caractères qualitatifs d'une réaction chimique en Tunisie. *Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies*, 20, 117-148.
- Bongers, A., Northoff, G., & Flynn, A. B. (2019). Working with mental models to learn and visualize a new reaction mechanism. *Chemistry Education Research and Practice*, 20(3), 554-569.
- Bosch, M., & Gascon, J. (2002). Organiser l'étude. 2. Théories et empiries. Dans J.-L. Dorier et al. (Éds.), *Actes de la 11e École d'Été de Didactique des Mathématiques* (pp. 23-40). Grenoble, France: La Pensée Sauvage
- Çakmakci, G., Leach, J., & Donnelly, J. (2006). Students' ideas about reaction rate and its relationship with concentration or pressure. *International Journal of Science Education*, 28(15), 1795-1815.
- Cariou, J. Y. (2011). Histoire des démarches en sciences et épistémologie scolaire. *Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies*, 3, 83-106.
- Centre National Pédagogique. (2010). *Chimie, 4ème année de l'enseignement secondaire, Sciences Expérimentales*. Retrieved from <https://drive.google.com/file/d/1MrumGD-tm0B3-n-sFAeLxUbZxUSwCMB0/view>.
- Chaachoua, H. (2010). *La praxéologie comme modèle didactique pour la problématique EIAH. Etude de cas : La modélisation des connaissances des élèves*. Note de synthèse HDR, Grenoble, France: Université Joseph Fourier.
- Chaachoua, H., & Comiti, C. (2010). L'analyse du rôle des manuels scolaires dans l'approche anthropologique. In A. Bronner et al. (Eds.), *Actes du deuxième Colloque de la Théorie Anthropologique du Didactique*. Uzès, France: IUFM de Montpellier.
- Chevallard, Y. (1989). Le concept de rapport au savoir, rapport personnel, rapport institutionnel, rapport officiel. Dans *Actes du séminaire de didactique des mathématiques et de l'informatique* (pp. 211-235). Grenoble: LSD Imag et Institut J. Fourier.
- Chevallard, Y. (1997). Familière et problématique, la figure du professeur. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 17(3), 17-54.
- Chevallard, Y. (2007). Passé et présent de la théorie anthropologique du didactique. In L. Ruiz-Higueras, A. Estepa & F. Javier Garcia (Eds.), *Sociedad, Escuela y Mathematics: aportaciones de la Teoria Antropologica de la Didactico* (pp. 705-746). Baeza, Espagne: Universidad de Jaen.
- Chevallard, Y. (2017). La TAD et son devenir : rappels, reprises, avancées. Dans G. Cirade et al. (Éds.), *Évolutions contemporaines du rapport aux mathématiques et aux autres savoirs à l'école et dans la société* (pp. 27-65). Retrieved from <https://citad4.sciencesconf.org>.
- Comiti, C. (2014). Recherche en didactique et formation des enseignants. *Revista do Programa de Pós-Graduação em Educação Matemática da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul*, 7, 444-456.
- De Jong, O., & Van Driel, J. (2004). Exploring the development of student teachers' PCK of the multiple meaning of topics. *International Journal of Sciences and Mathematic Education*, 2, 477-491.
- Devalay, M. (1989). Sur la méthode expérimentale. *Aster*, 8, 1-15.
- Dumon, A., & Mzoughi-Khadhraoui, I. (2014). Teaching chemical change modeling to Tunisian students: An "expanded chemistry triplet" for analyzing teachers' discourse. *Chemistry Education Research and Practice*, 15, 70-80.

- Fahmy, A. F. M. (2016). Uses of systemic approach and chemist's triangle in teaching and learning Chemistry: Systemic Chemistry triangle [SCT] as a teaching & learning strategy. *Journal of African Chemical Education*, 6(2), 69-95.
- Johnstone, A. H. (1991). Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem. *Journal of Computer Assisted Learning*, 7(2), 75-83.
- Johnstone, A. H. (2000). Teaching of chemistry: Logical or psychological? *Chemical Education: Research and Practice in Europe*, 1(1), 9-15.
- Justi, R., & Gilbert, J. (1999). A cause of a historical Science teaching: Use of hybrid models. *Science Education*, 83, 163-177.
- Kermen, I. (2018). *Enseigner l'évolution des systèmes chimiques au lycée: Savoirs et modèles, raisonnements d'élèves, pratiques enseignantes*. Rennes: Presses Universitaires de Rennes.
- Kermen, I., & Méheut, M. (2008). Mise en place d'un nouveau programme à propos de l'évolution des systèmes chimiques : Impact sur les connaissances professionnelles d'enseignants. *Didaskalia*, 32, 77-116.
- Kolomuç, A., & Tekin, S. (2011). Chemistry teachers' misconceptions concerning concept of chemical reaction rate. *International Journal of Physics and Chemistry Education*, 3(2), 84-101.
- Kurt, S., & Ayas, A. (2012). Improving student's understanding and explaining real life problems on concept of reaction rate by using a four-step constructivist approach. *Energy Education Science and Technology Part B: Social and Educational Studies*, 4(2) 979-992.
- Ladage, C. (2016). Les fondements épistémologiques de la pédagogie de l'enquête en question. *Penser l'Éducation*, 38, 1-28.
- Li, W. S. S., & Arshad, M. Y. (2014). Applications of multiple representation levels in redox reactions among tenth grade Chemistry teachers. *Journal of Turkish Science Education*, 11(3), 35-52.
- Ministère de l'Éducation. (2009). *Programmes de sciences physiques 3ème année et 4ème année de l'enseignement secondaire*. Direction générale des programmes et de la formation continue, Tunisie.
- Neyret, R. (1995). *Contraintes et déterminations des processus de formation des enseignants*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, France.
- Pélessier, L., & Venturini, P. (2016). Analyse praxéologique de l'enseignement de l'épistémologie de la physique : Le cas de la notion de modèle. *Education & Didactique*, 10(2), 63-90.
- Taber, K. S. (2013). Revisiting the chemistry triplet: Drawing upon the nature of chemical knowledge and the psychology of learning to inform chemistry education. *Chemistry Education Research and Practice*, 14, 156-168.
- Talanquer, V. (2011). Macro, submicro, and symbolic: The many faces of the chemistry "triplet". *International Journal of Science Education*, 33, 179-195.
- Turanyi, T., & Toth, Z. (2013). Hungarian university students' misunderstandings in thermodynamics and chemical kinetics. *Chemistry Education Research and Practice*, 14, 105-116.
- Wolfson A. J., Rowland S. L., Lawrie G. A., & Wright A. H. (2014). Student conceptions about energy transformations: progression from general chemistry to biochemistry. *Chemistry Education Research and Practice*, 15, 168-183.