



RESSOURCE SUR LA MODELISATION DU TITRAGE pH-METRIQUE ET SA MISE EN ŒUVRE EN SITUATION ORDINAIREⁱ

Sidi M. Tounkara¹ⁱⁱ,

Mohamed Soudani²

¹Département de physique et chimie,
Ecole Normale Supérieure,
Bamako, Mali

²Laboratoire S2HEP,
Université Claude Bernard Lyon 1,
Lyon, France

Résumé

Cette étude porte sur la mise en œuvre en situation ordinaire d'une ressource dans le domaine des sciences chimiques. La ressource a été construite par le chercheur conformément au cadre théorique de la modélisation par problématisation du savoir. La séance a été mise en œuvre dans une classe de Terminale sciences expérimentales sur la base des prescriptions officielles, par un stagiaire, formé aux activités de modélisation. La méthode de l'ingénierie didactique utilisée, a permis la manifestation et la déstabilisation de la conception d'élève, selon laquelle la réaction de titrage a lieu au saut de pH. La ressource peut être utilisée aussi bien dans le cadre de l'instrumentation que dans celui de l'instrumentalisation.

Mots clés : ressource, modélisation, titrage pH-métrique, situation ordinaire

Abstract:

This study covers the implementation, in ordinary situation, of a resource in the field of chemical sciences. The resource has been constructed by the researcher in accordance with the theoretical framework on modelling through knowledge problematization. The session was implemented in a final-year class of Experimental Sciences based on official prescriptions, by an intern trained on modelling activities. The method of didactic engineering used, has permitted the expression and the disruption of student's misconceptions, according to which the reaction of titration takes place at pH-jump. The resource can be used as part of the instrumentation as well as that of the exploitation.

ⁱ RESOURCE ON THE MODELLING OF pH-METRIC TITRATION IMPLEMENTED IN ORDINARY SITUATION

ⁱⁱ Correspondence: email siditounka@gmail.com

Keywords: resource, modelling, pH-metric titration, ordinary situation

1. Introduction

Plusieurs raisons expliquent le recours à la modélisation dans l'enseignement-apprentissage des sciences chimiques : la chimie est une science expérimentale et de modélisation (Soudani, 2014) ; les modèles sont des outils simples comparativement aux théories complexes (Robardet et Guillaud, 1997) ; les modèles théoriques sont emboîtés les uns aux autres des plus simples aux plus élaborés (Halbwachs, 1974) minimisant ainsi les remises en question d'un niveau d'enseignement à un autre ; la modélisation laisse une liberté didactique à l'enseignant (Johsua et Dupin, 2003 ; Martinand, 2014) ; la démarche de modélisation est une démarche scientifique en accord avec le socio-constructivisme, etc. Cependant, la démarche de modélisation présente, elle-même, un certain nombre de difficultés.

Premièrement, le terme modèle est polysémique. Le modèle scientifique a, lui-même, plusieurs définitions. Les nombreuses définitions du modèle scientifique, viennent du fait que le modèle moléculaire du professeur d'enseignement secondaire est différent du « modèle animal » du biologiste, lui-même différent du modèle du mathématicien ou du modèle atomique du physicien (Johsua et Dupin, 2003). Ces nombreuses définitions résultent également de l'évolution du modèle, qui est passé de la notion de représentation réduite ou simplifiée, au modèle scientifique comme construit symbolique, incluant le modèle analogique (Drouin, 1988 ; Varenne, 2014).

Deuxièmement, la nature du modèle peut être source de confusion entre modèle et réalité dans l'enseignement-apprentissage des sciences physiques et chimiques (Halbwachs, 1974). Selon l'auteur, connaître une situation, c'est la représenter par un modèle. Mais, lorsque les notions maniées par la théorie, sont des copies schématisées des objets tels que nous les percevons, il y a adhérence entre la situation, l'apparence perceptive, et leur transcription théorique. On est donc porté à identifier exactement la représentation et la réalité qu'elle représente. Tel est le cas des modèles descriptifs. Par contre, les modèles-images, sont ceux dont les unités de connaissance, entretiennent avec les objets qu'elles représentent le même rapport qu'une photographie (très agrandie) avec l'objet photographié. C'est le cas des modèles analogiques, où il y a, à la fois, un risque de confusion entre réalité et modèle, et entre les signes du modèle-image et ceux des systèmes descriptifs.

Troisièmement, dans les manuels scolaires, les limites des analogies ne sont pas discutées (Bächtold, 2014), contrairement aux études didactiques, comme celle faite sur le rapprochement des réactions acido-basique et d'oxydoréduction (Soudani et Constantin, 2003). Les enseignants, eux-mêmes, n'ont pas souvent conscience de ces analogies (Ibid.). Or, le modèle analogique, comme tout modèle scientifique a des limites (Halbwachs, 1974). Le « modèle géométrique » de Maxwell est une abstraction mathématique, alors que dans le cas du modèle des boules dures s'entrechoquant tel qu'il est utilisé en physique statistique et en théorie des gaz, celui-ci fait l'objet d'une

hypothèse physique, une idéalisation physique des faits (Bécu-Robilnaut, 2015). De plus, les enseignants s'appuient beaucoup plus sur des manuels que sur les programmes (Soudani, 2014).

Quatrièmement, la compréhension de la chimie nécessite d'appréhender les trois niveaux, que sont le macroscopique (ce qui peut être vu, touché, senti), le microscopique (atomes, molécules, ions et structures) et le symbolique (formules, équations, graphiques, symboles) (Johnstone, 2000 ; Atkins et Jones, 2017) ; les deux derniers registres relevant du modèle.

- Les enseignants et les auteurs de manuels scolaires ont-ils conscience de ces difficultés ?
- Comment les prendre en charge ?

Canac et Kermen (2019) ont construit et affiné (en situation ordinaire) une ressource basée sur le symbolique, qui à travers des textes anciens, présentait le plus de controverses, selon ces auteures. Mais la ressource peut également être construite à partir des obstacles liés aux relations sémantiques, dans le cadre de la modélisation. De nombreux travaux en didactique des sciences chimiques, ont mis en évidence que des élèves, mais aussi des futurs enseignants et enseignants débutants, sont confrontés à des difficultés de distinction des deux registres, le microscopique et le macroscopique. Ce dualisme a d'ailleurs opposé par le passé équivalentistes et structuralistes (Barlet et Plouin, 1997). La conséquence est l'affectation des propriétés du macroscopique au microscopique par des enseignants et futurs enseignants (Ibid.), ainsi que par des auteurs de manuels scolaires, du fait de l'absence du registre microscopique (Tounkara et *al.*, 2020a). La transformation chimique (registre macroscopique) est ainsi confondue avec la réaction chimique (modèle macroscopique), aussi bien par les élèves et les enseignants, que par des auteurs de manuels scolaires (Mzoughi-Khadhraoui et *al.* 2011 ; Kermen, 2018).

Une des solutions serait de construire des ressources, axées sur la dialectique modèle-réalité, dans le cadre de l'instrumentation ou de l'instrumentalisation (Trouche et Guedet, 2009). En effet, des auteurs sont unanimes, qu'il faut construire le modèle et non enseigner un modèle déjà élaboré (Robardet et Guillaud, 1997 ; Johsua et Dupin, 2003), en problématisant le savoir (Orange, 2005 ; Fabre et Musquer, 2009). D'où l'enseignement-apprentissage par situation-problème : manifestation et déstabilisation de conceptions d'élèves.

Dans cette perspective nous nous donnons comme objectif de construire des ressources pour leur mise à disposition des enseignants : l'activité de modélisation étant une contrainte de la chimie et la situation-problème, une contrainte des prescriptions officielles. En effet, dans notre contexte, le curriculum prescrit suivant l'approche par compétences (Camara et Na, 2019 ; Tounkara et *al.*, 2020a), recommande explicitement de faire recours à la situation-problème axée sur des conceptions d'élèves, en sciences expérimentales et en mathématiques (Tounkara et *al.*, 2020b). Dans ce projet de construction de ressources, nous présentons la ressource sur le titrage pH-métrique et sa mise en œuvre en situation ordinaire. Du fait que le titrage pH-métrique concentre des

conceptions d'élèves non déstabilisées jusque-là (Nakhleh et Krajcik, 1991 ; Bradley et Mosimege, 1998 ; Sheppard, 2006 ; Le Maréchal et Naija, 2008 ; Ouertatani et Dumon, 2008), malgré ce puissant outil didactique, qu'est la conversion de registres (Duval, 2006). En effet, le titrage acido-basique par pH-métrie est le lieu de plusieurs conversions de registres : le numérique, le graphique et l'algébrique ; mais aussi le macroscopique, le microscopique et le symbolique. Une ressource élaborée par le chercheur, sera mise en œuvre en situation ordinaire par un professeur de lycée en classe de Terminale sciences expérimentales dans un lycée public. La publication des résultats de cette recherche pourrait pallier, en partie, les difficultés de mode de diffusion des ressources au niveau des enseignants en activité.

2. Revue de la littérature

2.1 Les trois niveaux de la chimie

Plusieurs auteurs ont travaillé sur les difficultés d'appréhension des trois niveaux de la chimie et la confusion entre modèle et réalité qui en résulte (Johnstone, 2000 ; Laugier et Dumon, 2000 ; Kermen, 2018).

Selon Johnstone (2000), la compréhension de la chimie se fait à partir de trois niveaux, sous forme de triplet, aucun d'eux n'étant supérieur aux autres. Il s'agit du macroscopique (ce qui peut être vu, touché, senti), le sub-microscopique (atomes, molécules, ions et structures) et la représentation symbolique (formules, équations, molarité, graphiques, symboles) (Figure 1). La position de l'auteur est de ne pas les introduire simultanément. Cette position est conforme à celle présentée dans la 7^e édition du célèbre ouvrage « Principes de chimie » de Atkins et Jones (2017). Selon ces auteurs, le chimiste pense au niveau microscopique, conduit ses expériences au niveau macroscopique et représente les deux symboliquement. Ils cartographient ces trois aspects de la chimie sous la forme d'un triangle, dans lequel, on peut être plus proche de l'un des trois pôles. Le point de vue de ces auteurs va dans le sens de l'élaboration des modèles, ce qui permettra aux élèves de circuler entre les structures praxéologique (macroscopique) et théorique (microscopique et symbolique), présentées ci-dessous (Figure 1). Mais les enseignants sans formation en la matière sont confrontés à leurs propres conceptions, qu'ils véhiculent auprès des élèves. Un questionnaire de 21 items, a été soumis à un effectif de 231 enseignants. Les résultats montrent entre autres que, 41,2% des enquêtés, contre 43,3%, estiment que les atomes et molécules ne sont pas des constructions mentales ; et 77,5% des enquêtés estiment que les théories découlent de l'observation (Dorsah, 2020).

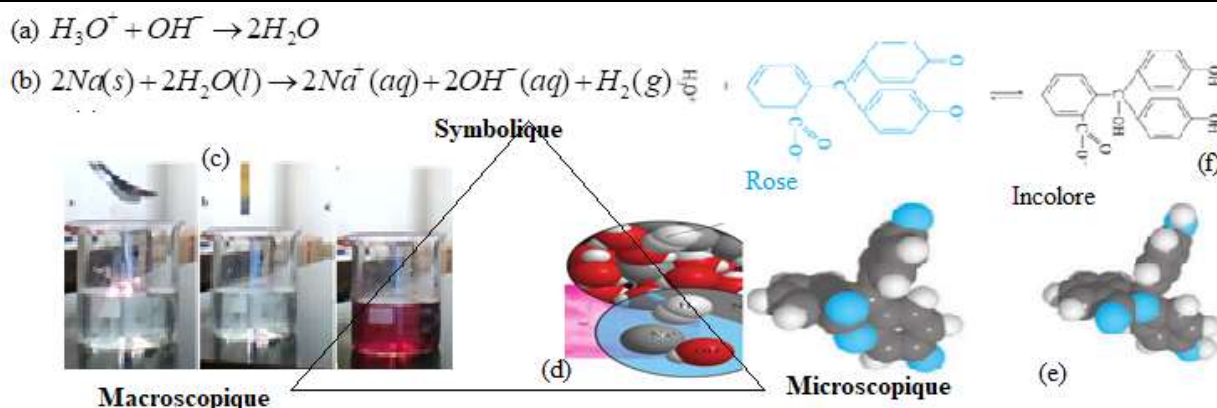


Figure 1 : (a) équation de réaction chimique de dosage d'acide fort par base forte, (b) équation de réaction chimique du sodium avec l'eau, (c) réaction du potassium avec l'eau en présence de phénophtaléine et du papier pH ; (d) interprétation de la réaction du sodium avec l'eau et de (e) celle de la transformation de la phénophtaléine et (f) structure de ces deux formes en équilibre chimique (adapté de Atkins et Jones, 2017 et de Holler et Crouch, 2015).

2.1 Insuffisance des conversions classiques de registres en pH-métrie

Les études ci-dessous montrent les difficultés liées au modèle, notamment l'obstacle lié à la phase pendant laquelle la réaction de dosage a lieu, qui n'est pas franchi par les différents changements de registres généralement utilisés en pH-métrie (Tableau 1).

Tableau 1 : Registres numérique, graphique et algébrique en pH-métrie classique

Registre numérique		Registres graphique et algébrique
V (mL)	pH	
0,00	1,30	
10,00	1,60	
20,00	2,15	
24,00	2,87	
24,90	3,87	
25,00	7,00	
25,10	10,12	
26,00	11,12	
30,00	11,80	

Morge et Doly (2013) ont passé en revue les résultats de dizaines d'auteurs (période allant de 1983 à 2011), qui montrent que les enseignants ont eux aussi des difficultés dans la compréhension épistémologique de la notion de modèle. Dans le cadre de la formation des enseignants, ils ont adressé un questionnaire à des professeurs débutants pour savoir, si les critères de choix des enseignants rejoignent ceux auxquels ils sont parvenus quant au caractère adéquat des modèles à enseigner permettant de distinguer la réalité et le modèle. Il s'agit de savoir notamment : (1) s'ils choisissent une réalité directement perceptible ; (2) s'ils pensent spontanément qu'ils peuvent utiliser plusieurs modèles pour représenter la même réalité ; (3) s'ils considèrent que l'existence d'un écart important entre modèle et réalité est une condition favorable à leur distinction. Les

résultats montrent que la plupart des 25 futurs enseignants associent systématiquement la notion de modèle à un champ empirique non perceptible, comme si le modèle avait pour fonction de représenter la réalité lorsque celle-ci n'est pas perceptible. Les résultats montrent également que la plupart des enseignants (23 sur 25) considèrent le modèle comme une copie simplifiée (sans écart avec la réalité). Cette étude conforte les remarques de Halbwachs (1974) et amena les auteurs à écarter les modèles non perceptibles. Mais cette position, qui consiste à écarter les modèles non perceptibles, est intenable en chimie où l'on parle de plusieurs modèles atomiques et moléculaires. Une des solutions est de faire construire les modèles (Figure 1) en faisant appel à la sémiotique de Peirce, selon lequel, le signe dit quelque chose de l'objet ; que celui-ci peut être réel, imaginable ou unimaginable, mais l'interprétant auquel le signe renvoie n'est pas l'objet (Soudani et *al.*, 2014).

Nakhleh et Krajcik (1991), ont étudié l'effet de trois techniques de titrage acido-basique sur l'apprentissage des concepts d'acide, de base et de pH : l'indicateur coloré, le pH-mètre et le micro-ordinateur, respectivement dénommés technologies de bas niveau, de niveau intermédiaire et de haut niveau. Trois groupes ont été formés à partir de 15 étudiants et chaque groupe applique une technique. Les entretiens ont eu lieu avant et après les expériences de titrage d'un acide fort par une base forte, d'un acide faible par une base forte et d'un polyacide par une base forte. Les résultats de l'analyse des cartes conceptuelles, montrent la performance du groupe disposant du microordinateur, mais ses membres n'ont toujours pas une bonne compréhension de l'ionisation et de la neutralisation. Cette étude montre que les étudiants pensent systématiquement à la neutralisation ; la phase pendant laquelle la réaction de titrage a lieu n'est donc pas identifiée (Tableau 1).

L'enquête de Bradley et de Mosimege (1998), sous forme d'items à choix multiples, adressés à des futurs professeurs de chimie, a porté sur les acides et les bases : théories, propriétés, force, équations, pH et représentations moléculaires. Certaines questions ont été tirées des livres et des sujets d'examen, mais d'autres ont été élaborées en vue de faire émerger les conceptions des futurs professeurs. Les questions ont été affinées en faisant recours à un groupe pilote. Les résultats montrent entre autres que des futurs professeurs considèrent que l'indicateur neutralise l'acide et qu'il formerait la base. Nous voyons donc que la réaction de titrage est confondue avec les propriétés acido-basiques de l'indicateur coloré (Figure 1).

Sheppard (2006), préconise un titrage acido-basique assisté d'ordinateur, avec des phases de prédiction, d'observation et d'explicitation pour une meilleure compréhension de la réaction de neutralisation (qui a lieu entre acide fort et base forte) et de la notion de pH. Les courbes linéaires, concaves et convexes, prévues par la plupart des seize étudiants américains, sont éloignées de la courbe de pH et 11 étudiants américains sur les 16 interrogés, disent qu'il n'y a pas de réaction dans la première partie de la courbe et qu'elle a lieu au saut de pH. Les mêmes études ont montré qu'une dizaine d'étudiants pensent que la réaction chimique a lieu à la neutralisation. Selon l'auteur, les conceptions selon lesquelles, l'acide est plus fort que la base, ou que le pH est la mesure de la force de

l'acide, en plus des difficultés liées aux variations logarithmiques de la concentration des ions hydronium, sont à la base de ces obstacles. Ces résultats montrent également que les conversions de registres du numérique au graphique (Tableau 1) n'ont pas permis un meilleur apprentissage du titrage acido-basique par pH-métrie.

Le Maréchal et Naïja (2008) ont mené des recherches auprès des élèves et étudiants sur le titrage acido-basique par pH-métrie et par conductimétrie. Le titrage acide-base par pH-métrie a concerné quarante binômes appartenant à deux groupes de TP (première année de l'université de Bizerte, Tunisie). L'étude du titrage acido-basique par conductimétrie a concerné 21 binômes d'un même professeur à Lyon en France, qui ont fourni leur compte-rendu. En pH-métrie, sur les 36 binômes qui ont répondu à la question posée, seuls cinq binômes donnent la bonne réponse, selon laquelle, la réaction de titrage commence au premier point de la courbe de titrage et prend fin à l'équivalence ; par contre 10 binômes sur les 11 qui ont répondu à la même question sur la conductimétrie, donnent la bonne réponse. Les auteurs concluent à l'existence de traits de surface trompeurs de la pH-métrie et préconisent le remplacement de la pH-métrie par la conductimétrie, mais en même temps, ils estiment que la manifestation d'erreurs est nécessaire pour leur prise en charge. Ici également, l'obstacle n'est pas déstabilisé par le changement de registre du numérique au graphique. De plus, le titrage pH-métrique peut être une contrainte liée au programme, contrairement à la conductimétrie, comme dans notre contexte.

Ouertatani et Dumon (2008), ont fait recours à la modélisation dans le sens de l'utilisation des modèles dans le cadre des titrages acide-base, c'est-à-dire, la mise en relation du registre empirique avec le monde des théories et des modèles, et avec les représentations symboliques permettant de les décrire. Un questionnaire papier/crayon de six questions, a été soumis à 51 élèves de Terminale et à 127 étudiants de la 1^{re} année d'université (faculté des sciences). Les résultats relatifs à la première question montrent que la moitié des étudiants ont des difficultés à traduire un événement du registre empirique (le titrage) en utilisant le registre des modèles (la symbolisation). Les résultats relatifs à la deuxième question montrent que le pourcentage d'élèves et d'étudiants qui semblent établir un rapport entre l'état du système chimique et la courbe de pH est faible, respectivement 21% et 11%. Cette étude, comme toutes les autres, montre la prégnance de la conception d'élèves, selon laquelle, la réaction de titrage a lieu au saut de pH ou après celui-ci. Mais le dépassement de l'obstacle pour qu'il y ait apprentissage, n'a pas été pris en compte par ces travaux. Une des solutions serait la construction de modèles par des élèves en situation ordinaire, à partir d'une ressource axée sur la modélisation. D'où notre hypothèse :

- Une ressource construite sur la base de la problématisation du savoir et la modélisation des différentes solutions, permet par sa mise en œuvre en situation ordinaire, la manifestation et la déstabilisation de l'obstacle lié au titrage pH-métrique.

Cette hypothèse se décline en deux sous-hypothèses.

H1 : la mise en œuvre de la séance de pH-métrie suivant le schéma classique conduit à la manifestation de l'obstacle. C'est ce que montrent les résultats des travaux cités précédemment. La manifestation de l'obstacle constitue donc notre variable dépendante ; elle dépend des interprétations faites par des élèves ou groupes d'élèves.

H2 : les activités de modélisation portant sur les différentes solutions, avant et après le point d'équivalence, permettent la déstabilisation de la conception d'élèves et ce dépassement de l'obstacle permet un meilleur apprentissage. Le dépassement de l'obstacle est donc notre variable dépendante. Les activités de modélisation sont nos variables indépendantes.

3. Méthodologie

Pour éprouver nos hypothèses, la méthodologie utilisée est celle de l'ingénierie didactique, qui remonte aux années 60. Elle se déroule en quatre phases : la conception de la ressource (Tableau 4 ; Fig. 2 et 3) à partir des analyses préalables (celles de notre revue de la littérature et celles du Tableau 3) et des effets de l'enseignement usuel (Tounkara et *al.*, 2020b) ; l'analyse *a priori* (Tableau 2) ; l'expérimentation (sa mise en œuvre) et l'analyse *a posteriori* de la mise en œuvre de la ressource en situation ordinaire, pour une validation interne (Artigue, 2008). La séance a été mise en œuvre en 2018 par un stagiaire de M2 dans une classe de Terminale Sciences Expérimentales (TSExp), d'un des plus grands lycées de la capitale : le lycée Massan Makan DIABATE de Baco-djicoroni en Commune V du District de Bamako. L'effectif de la classe est de 35 élèves. Le stagiaire a été formé à la démarche de modélisation en sciences chimiques. L'analyse praxéologique (Tableau 3) de la ressource avant sa mise en œuvre, permet de s'assurer que chaque technique utilisée pour accomplir une tâche ou type de tâche, est justifiée par une technologie (discours scientifique), elle-même, justifiée par une théorie (Chevallard, 2015). Quant au recueil des données, nous avons procédé à une observation directe de la séance et à la collecte des productions des élèves ; leur analyse étant qualitative.

Tableau 2 : Analyse *a priori* de la séance

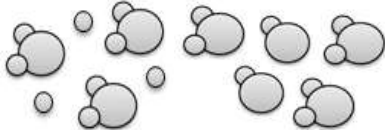
Avant modélisation	Manifestation de la conception : la réaction de titrage acido-basique a lieu au saut de pH.
Après modélisation de la solution acide et de la solution basique au cours du titrage	Déstabilisation de la conception : la réaction de titrage acido-basique a lieu avant le saut de pH. 

Tableau 3 : Analyse praxéologique de la ressource

Phases	Types de tâche	Technique	Technologies	Théorie
Avant le point équivalent V(NaOH) : 0-10-15-20 ; pH: 0,72-1,26-1,55-2,37	Caractérisation de la solution	Coloration de la solution	Propriétés amphotères de l'indicateur coloré	Théorie de Bronsted
	Modélisation de la solution (acide)	Modèle moléculaire compact (H_2O, H^+)	1) Réarrangement des atomes 2) $N_A V_A - N_B V_B$	Conservation de la matière
Après le point équivalent V(NaOH) : 21,5-23-24,5-26-31 pH : 9,62-11,5-11,48-11,67-11,90	Caractérisation de la solution	Coloration de la solution	Propriétés amphotères de l'indicateur coloré	Théorie de Bronsted
	Modélisation de la solution (basique)	Modèle moléculaire compact (H_2O, OH^-)	1) Réarrangement des atomes 2) $N_B V_B - N_A V_A$	Conservation de la matière

4. Résultats et Discussion

4.1 Présentation de la ressource

La ressource (sans la phase de conception) est présentée ci-dessous (Tableau 4).

Tableau 4 : Présentation succincte de la ressource (situation-problème : Sp)

Ressource pour professeurs de physique-chimie (pH-métrie, Terminale : partie I)					
Ordre d'enseignement	Secondaire général		Séquence	Acide-base	
Programme	Officiel		Séance	Titration pH-métrie	
Classe	TSEx et TSExp		Pré-requis	Equivalence acido-basique, pH solution acide, pH solution basique, virage indicateur coloré, modèle moléculaire	
Discipline	chimie		Durée	2 heures	
Objectifs d'apprentissage	Identification de la phase où a lieu la réaction de dosage ; détermination du volume équivalent ; détermination du pH correspondant au point équivalent.				
Matériel et produits	pH-mètre (portable, paillasse), béchers, burette, agitateur magnétique, solution d'acide chlorhydrique et d'hydroxyde de sodium, phénophtaléine, pissette d'eau distillée.				
<p>Titration : par groupe, si matériel limité, par l'enseignant, il distribue des fiches aux élèves qui les remplissent au fur et à mesure. A la fin de l'expérience, il énonce ou donne par écrit la situation-problème.</p> <p>Situation-problème : Pendant quelle phase, la réaction de titration a lieu : avant, pendant ou après le saut de pH ? Justifiez votre réponse.</p> <p>Validation des hypothèses : Par petits groupes, les hypothèses formulées vont en faveur du saut de pH. L'enseignant écrit la Consigne pour reformation (invalidation).</p> <p>Consigne : Compétez les modèles en poursuivant la modélisation et répondez à la question en comparant les modèles construits aux teintes des solutions.</p> <p>L'enseignant guide, explique, les groupes reformulent leur hypothèse, il procède à la mise en commun. La réponse attendue est avant le saut de pH (les modèles montrent qu'après il n'y a plus d'acide), or la réaction a lieu entre les ions hydroxyde et hydronium.</p> <p>Méthodologie</p>					
Étape ou phase	Durée	Organisation du groupe classe	Rôle de l'enseignant (Ce qu'il fait)	Activité des élèves (Ce qu'ils font)	Difficultés attendues et Régulations

1. Expérience	25 min	Groupe de 2 élèves	Installe les dispositifs, distribue le protocole et le tableau à compléter	Font le titrage par binôme, remplissent le tableau (volume, teinte, pH)	Erreur de parallaxe, non stabilisation des valeurs
2. Situation-problème : recherche par groupe	15 min	Groupe de 2 élèves	Donne l'énoncé et des explications aux groupes sur le saut de pH.	Recherche par groupes, écrivent leurs hypothèses.	Réponse attendue : pendant ou après le saut de pH
3. Mise en commun et (in)validation	10 min	L'ensemble de la classe	Choisis les réponses représentatives.	Présentent les productions et argumentations	Invalidation et reformulation d'hypothèse à partir d'une consigne
4. Reformulation d'hypothèse	15 min	Groupe de 2 élèves	Rôle de tuteur, donne l'énoncé de la consigne. Explications aux groupes sur la structure solide.	Poursuivent la modélisation par groupes en complétant les colonnes du tableau	Représentation microscopique : comparer à la teinte de la solution
5. Mise en commun et validation	15 min	L'ensemble de la classe	Il joue le rôle d'animateur.	Présentent et discutent de leurs productions pour validation.	Déstabilisation de la conception : réponse attendue, avant le saut de pH
6. Tracé courbe pH (pHe, Ve, concentration de la solution)	30 min	Groupe de 2 élèves	Rôle de tuteur, Explications aux groupes sur la méthode aux tangentes	Font le tracé de la courbe, les projections et calculent la concentration.	Les élèves peuvent proposer d'autres méthodes
7. Institutionnalisation	10 min	L'ensemble de la classe	Donne les différentes équations	Participent à l'écriture des équations	$N_A V_A > N_B V_B$ $N_A V_A = N_B V_B$ $N_A V_A < N_B V_B$

4.2 Présentation des résultats et analyse *a posteriori*

Une des productions d'élèves, celle du groupe quatre, ainsi que les résultats obtenus auprès de l'ensemble des groupes, sont présentés ci-dessous (Figures 2 et 3).

Les résultats (Fig. 3), montrent que tous les groupes ont reconnu les différentes solutions acides et basiques à partir de la teinte rose de la phénolphthaléine (signe indiciel au sens de Peirce) en milieu basique et du fait qu'elle soit incolore en milieu acide (registre macroscopique). Ils ont relié les valeurs du pH à la nature de la solution (connexion des registres macroscopique et symbolique) à partir des modèles iconiques (registre microscopique). Ils ont également été unanimes lors de la validation d'hypothèses, qu'on est passé du milieu acide au milieu basique (relation praxéologique), d'où le saut de pH (structure théorique). Cependant un des groupes pense que la réaction de dosage a lieu avant le saut de pH, sans pouvoir l'expliquer ; pour les autres groupes, elle a lieu lors du saut de pH. Seuls les résultats relatifs à l'obstacle ont été présentés.

Groupe 4

Fiche élève N° 2
Titration acido-basique par pH-métrie

Situation
 Lors du titrage de l'acide chlorhydrique par la soude : lorsque la solution obtenue est acide, nous avons en solution des ions H^+ et des molécules d'eau ; lorsque la solution obtenue est basique, nous avons en solution des ions OH^- et des molécules d'eau ; lorsque la solution obtenue est neutre, nous avons en solution uniquement des molécules d'eau H_2O (figure ci-dessous).

Figure : Représentation de H^+ , de H_2O et de OH^- .

Consigne : Continuer la modélisation dans le tableau, sachant que la phénophtaléine est incolore en milieu acide et rose en milieu basique.

Tableau : Différentes phases lors du titrage par pH-métrie de HCl par NaOH à la même concentration.

Ions H^+	Ions OH^-	Solution obtenue	Représentation	V(total) NaOH
V = 40 mL	0 mL	Teinte : incolore Solution : acide pH = 0,32		0 mL
V = 40 mL	On ajoute V = 10 mL	Teinte : incolore Solution : acide pH = 1,26		V = 10 mL
V = 40 mL	On ajoute V = 5 mL	Teinte : incolore Solution : acide pH = 1,55		V = 15 mL
V = 40 mL	On ajoute V = 5 mL	Teinte : incolore Solution : acide pH = 2,31		V = 20 mL
V = 40 mL	On ajoute V = 1,5 mL	Teinte : rose Solution : basique pH = 3,62		V = 21,5 mL
V = 40 mL	On ajoute V = 1,5 mL	Teinte : rose Solution : basique		V = 23 mL

Figure 2 : Production du groupe 4 sur le titrage pH-métrique

		pH = 11,46		
V = 40 mL	On ajoute V = 1,5 mL	Teinte : rose Solution : basique pH = 11,48		V = 24,5 mL
V = 40 mL	On ajoute V = 1,5 mL	Teinte : rose Solution : basique pH = 11,63		V = 26 mL
V = 40 mL	On ajoute V = 5 mL	Teinte rose Solution basique pH = 11,30		V = 31 mL

Question : Pendant quelle phase la réaction de titrage a lieu : avant, pendant ou après le saut de pH ? Justifiez votre réponse.

Il y a eu titrage après le saut de pH. Parce que il y a eu coloration de la phénophtaléine.

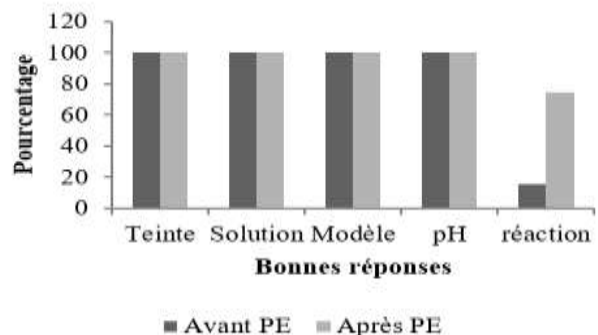


Figure 3 : à gauche : production du groupe 4 sur le titrage pH-métrique ; à droite : Taux de réponses des élèves de Terminale sur le titrage pH-métrique acido-basique, avant et après le point équivalent (PE)

4.3 Discussion

Le titrage pH-métrique a lieu en trois phases : avant le point équivalent, au point équivalent et après celui-ci. L'étude menée par Nakhleh et Krajcik (1991), montre un obstacle au niveau du point d'équivalence. Celle menée par Bradley et Mosimege (1998), montre le recours à une causalité linéaire impliquant l'indicateur coloré en lieu et place de la réaction de titrage, du fait de leur superposition (Figure 1). Les études menées par Sheppard (2006), Le Maréchal et Naija (2008) et par Ouertatani et Dumon (2008), mettent en évidence la prégnance de l'obstacle lié à la phase pendant laquelle la réaction de titrage a lieu. D'après Duval (2006), la conversion de registre permet un véritable apprentissage par rapport aux traitements dans un registre donné. Mais l'ensemble des études précédentes montre que le changement de registre, du numérique au graphique et du graphique à l'algébrique (Tableau 1), n'ont pas permis le dépassement de l'obstacle. Les relations sémantiques (entre structure praxéologique et structure théorique) sont toujours en cause. Les étudiants, en travaux pratiques, assimilent la persistance de la teinte (changement effectif de teinte, suite à la décoloration des dernières gouttes) à l'intensité de cette coloration : ils mesurent donc le volume par excès. Or, l'objectif d'un titrage est, en premier lieu, la détermination de la concentration de la solution titrée, à partir du volume équivalent, par suite d'une perturbation indicatrice de fin de réaction.

Nous nous sommes donc inscrits dans le cadre théorique de la problématisation : la situation-problème est énoncée par l'enseignant pour la manifestation de la conception d'élève, les modèles sont ensuite construits par les élèves pour la résolution du problème par déstabilisation de la conception. La ressource a été construite dans ce cadre en raison de cette conception d'élève, mise en évidence par de nombreuses études, selon laquelle, la réaction de titrage a lieu au saut de pH, sans que ces travaux ne la prennent en charge pour son dépassement. L'objectif était donc de construire une telle ressource afin de permettre la manifestation et la déstabilisation de la conception en situation ordinaire. La séance sur le titrage pH-métrique a été mise en œuvre dans une classe de Terminale sciences expérimentales, par un stagiaire ayant été formé à la démarche de modélisation. Nous avons utilisé la méthodologie de l'ingénierie didactique pour éprouver notre hypothèse de recherche. L'analyse *a posteriori* des résultats, montre sa parfaite correspondance avec l'analyse *a priori*. D'où l'atteinte des objectifs du côté des élèves et du professeur stagiaire.

4.3.1 Du côté des élèves

Ce qui a été imaginé au niveau microscopique, a été schématisé par représentation des modèles moléculaires, ceux-ci ayant contribué, comme signes iconiques, dans la communication à propos des modèles construits, par des savants durant une longue période du développement de la chimie (Soudani et al., 2014). En présence de faits réels (registre macroscopique) et de leurs modélisations (registre microscopique), les élèves reformulent leur hypothèse (conflit socio-cognitif), ce qui conduit à la déstabilisation de la conception. Cette activité de modélisation a donc permis l'apprentissage des phases du titrage pH-métrique et l'évolution de compétences des élèves par la conceptualisation

de la réaction de titrage acido-basique (savoir), la pratique de la démarche scientifique (savoir-faire) et le développement de l'esprit de groupe (savoir-être). La construction de telles compétences, est axée sur l'accomplissement de tâches dans une situation nouvelle, à la lumière d'une analyse praxéologique fine.

4.3.2 Du côté de l'enseignant

Des difficultés de gestion du temps ont été constatées au niveau de l'enseignant. Cette démarche ne permet pas l'économie de temps que l'inductivisme procure aux enseignants (Robardet et Guillaud, 1997). L'enseignant a tout de même rompu avec la démarche inductiviste axée sur les OPO (Canac et Kermen, 2019 ; Tounkara et *al.*, 2020b). L'organisation de la classe est celle des petits groupes, bien que celle-ci puisse être mise en place sans que l'enseignant fasse recours à la démarche de modélisation par les élèves, en restant fidèle à l'inductivisme ou à l'empirisme (Désautels et *al.*, 1993). La démarche de modélisation par situation-problème a permis à l'enseignant de faire travailler les élèves par petits groupes tout en les associant à l'élaboration du savoir. La conception d'élèves, a été déstabilisée lors de la validation des hypothèses : tous les groupes ont reformulé leur hypothèse en affirmant que la réaction de titrage a lieu avant le point équivalent. Il aurait été préférable de s'appuyer sur des binômes, mais le stagiaire faisait face à un effectif pléthorique, dont il avait la charge de gérer. Cependant, la mise en œuvre de la séance dans ce contexte a été possible, grâce à la formation aux activités de modélisation, à laquelle le stagiaire a pris part.

5. Recommandation

Dans un article précédent (Tounkara et *al.*, 2020b), nous avons montré que la situation-problème était assimilée à une situation introductive de séances par des enseignants. Nous recommandons donc la formation des enseignants aux activités de modélisation afin de faciliter l'appropriation de telles ressources et pour une meilleure compréhension des prescriptions officielles de plus en plus axées sur l'approche par compétences.

6. Conclusion

La ressource mise en œuvre a été construite sur la base d'une double correspondance : d'un côté, celle de la didactique des sciences et l'épistémologie de la discipline de référence, et de l'autre, la correspondance entre les recommandations de la didactique des sciences avec celles des prescriptions officielles. Elle a donc permis au stagiaire de s'appuyer sur une situation-problème et de faire émerger et déstabiliser l'obstacle lié au titrage pH-métrique. Toutes choses ayant favorisé un meilleur apprentissage du titrage pH-métrique en situation ordinaire. Nous sommes donc allés au-delà de la simple manifestation de l'obstacle. Nos hypothèses de recherche se sont donc vérifiées. Cependant, la mise en œuvre de cette séance, a nécessité une formation des enseignants aux activités de modélisation, à laquelle le stagiaire avait pris part. La ressource peut être

utilisée dans le cadre de l'instrumentation (elle outille les enseignants) et de l'instrumentalisation (elle est adaptable à d'autres types de titrages). Elle peut également servir à l'élaboration d'une grille d'analyse de la démarche de modélisation en formation des enseignants.

A propos des auteurs

Sidi M. Tounkara est présentement Enseignant-Chercheur au département de physique et chimie de l'Ecole Normale Supérieure de Bamako au Mali. Ses thèmes de recherche sont : (1) Chimie appliquée à l'Eau et l'Environnement, (2) Problématisation et Modélisation en Didactique des Sciences Chimiques, Ingénierie de Formation. Mohamed Soudani est enseignant-chercheur à l'université Claude Bernard Lyon 1 (France) en didactique des sciences chimiques et physiques, formateur d'enseignants à l'INSPE de Lyon. Ses thèmes de recherche portent sur : problématisation, conceptualisation, modélisation, fiction réaliste, sémiotique, mondes possibles. Pour plus de détail : <https://univ-lyon1.academia.edu/MohamedSoudani>

Remerciements

Mes remerciements vont au Professeur Soudani ; c'est grâce à lui que le travail de thèse (non publiée) dont est issu cet article, a pu s'accomplir.

Références

- Artigue, M. (1988). Ingénierie didactique. In : *Recherches en didactique des mathématiques*, 9, Paris, 281-308.
- Atkins, P., Jones, L. (2016). Principes de chimie. De Boeck Université, Bruxelles, Belgique.
- Bächtold, M., Munier, V., Guedj, M., Lerouge, A., Ranquet, A. (2014). « Quelle progression dans l'enseignement de l'énergie de l'école au lycée ? Une analyse des programmes et des manuels », RDST [En ligne], consulté le 23 mars 2017. URL : <http://rdst.revues.org/932>
- Barlet, R., Plouin, D. (1997). La dualité macroscopique-microscopique un obstacle sous-jacent aux difficultés en chimie dans l'enseignement universitaire. *ASTER*, 25, 143-174.
- Bécu-Robinault, K. (2015). Un cadre épistémologique-sémiotique pour concevoir des séances et analyser des pratiques d'études et d'enseignement de la physique : habilitation à diriger des recherches de l'université de Toulouse. Education. Université Toulouse Jean-Jaurès. <tel-01237838>
- Bradley, J., D., Mosimege, M., D. (1998). Misconceptions in acids and bases: a comparative study of student teachers with different chemistry backgrounds, *S.Afr.J.Chem.*, 51(3), 137-145.

- Camara, F., Na, L. (2019). Mali's education system: an overview of mathematics curriculum in Mali, from kindergarten to secondary school. *European Journal of Education Studies*, 6(6), 208-230. doi: 10.5281/zenodo.3463643
- Canac, S. & Kermen, I. (2019). Conception d'une ressource didactique fondée sur l'histoire des sciences pour introduire les formules chimiques au collège. IREM de Paris, 2018, Cahiers du Laboratoire de Didactique André Revuz, Christophe Hache, 9782866123888. <https://irem.univ-paris-diderot.fr/>.
- Chevallard, Y. (2015). La fonction professorale : esquisse d'un modèle Didactique. http://yves.chevallard.free.fr/spip/spip/IMG/pdf/La_fonction_professorale.pdf
- Désautels, J., Larochelle, M., Gagné, B. (1993). La formation à l'enseignement des sciences : le virage épistémologique. *Didaskalia*, (1), 49-67.
- Dorsah, P. (2020). Pre-service teachers view of nature of science (NOS). *European journal of education studies*, 7(6), 123-146. doi: 10.5281/zenodo.3365422
- Drouin A, M. (1988). « Le modèle en questions ». *ASTER*, 17, 1-20.
- Duval, R. (2006). Quelle sémiotique pour l'analyse de l'activité et des productions mathématiques. *Relime*, numéro Especial, 45-81.
- Fabre, M., Musquer, A. (2009). Les inducteurs de problématisation. *Les Sciences de l'éducation - Pour l'Ère nouvelle*, 3, 111-129.
- Halbwachs, F. (1974). *La pensée physique chez l'enfant et le savant*. Editions Delachaux & Niestlé, France.
- Holler, J. F., Crouch, S. R. (2015). *Chimie analytique*, De Boeck Supérieur, Bruxelles, Belgique.
- Johnstone, A., H. (2000). Teaching of chemistry – Logical or psychological? The practice of chemistry education (invited contribution). *Chemistry education: research and practice in Europe*, 1(1), 9-15.
- Joshua, S., Dupin, J., J. (2003). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*, Quadriga, Paris, France.
- Kermen, I. (2018). Comment le caractère dual, macroscopique-microscopique, de la chimie s'incarne-t-il dans son enseignement ? Réflexions autour des modèles et du langage. *Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique Chimie*, 112 (1000), 95-108. hal-01742672
- Laugier, A., Dumon, A. (2000). Histoire des sciences et modélisation de la transformation chimique en classe de seconde. *BUP*, 94 (826), 1261-1284.
- Le Maréchal, J-F., Nàija, R. (2008). La mesure dans l'enseignement de la chimie : Cas d'une approche des titrages par pH-métrie et conductimétrie. *Aster*, 47, 103-130.
- Martinand, J-L. (2014). « Point de vue V – Didactique des sciences et techniques, didactique du curriculum », *Éducation et didactique*, 8 (1). <http://journals.openedition.org/educationdidactique/1886>
- Morge, L., Doly, A-M. (2013). L'enseignement de notion de modèle : quels modèles pour faire comprendre la distinction entre modèle et réalité ? In : *Spirale. Revue de recherches en éducation. L'enseignement intégré de science et de technologie*

- (EIST) au collège : à la recherche d'un curriculum, 52, 149-175.
https://www.persee.fr/doc/spira_0994-3722_2013_num_52_1_1066
- Mzoughi-Khadhraoui, I., Dumon, A., A-Trabelsi, M. (2011). Le savoir à enseigner relatif à la transformation chimique en première année de lycée en Tunisie et sa perception par les enseignants. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 10(1), 153-177.
- Nakhleh, M. B., Krajcik, J., S. (1991). The Effect of Level of Information as Presented by Different Technologies on Students' Understanding of Acid, Base, and pH Concepts. In: *annual meeting of the National Association for Research in Science Teaching*, Lake Geneva.
- Orange, C. (2005). Problématisation dans l'enseignement scientifique. *Aster, Problème et problématisation*, 40, 3-11.
- Ouertatani, L., Dumon, A. (2008). L'appropriation des « objets de savoir » relatifs aux titrages acide-base par les élèves et les étudiants tunisiens ». *Didaskalia*, 32, 9-40.
- Robardet, G., Guillaud, J-C. (1997). *Éléments de Didactiques des Sciences physiques*, Presses universitaires, Paris, France.
- Sheppard, K. (2006). High school students' understanding of titrations and related acid-base phenomena. *The Royal Society of Chemistry Education Research and Practice*, 7 (11), 32-45.
- Soudani, M., Constantin, S. (2003). « Liens entre oxydo-réduction et acide-base vus par des enseignants de sciences physiques ». In : 3èmes Rencontres Scientifiques de l'ARDIST, 53-59.
- Soudani, M. (2014). *Le concept d'oxydoréduction : Analyse épistémologique et didactique*, Editions universitaires européennes, Paris, France.
- Tounkara, S., M., Diawara, M., Soudani, M. (2020). Analyse écologique des savoirs dans des manuels de chimie du fondamental et du secondaire au Mali. *European journal of education studies*, 7(3), 150-164. doi: 10.5281/zenodo.3756196
- Tounkara, S., M., Diawara, M., Soudani, M. (2020). Appropriation par des enseignants du secondaire de la situation-problème dans le cadre de la réforme curriculaire au Mali. *European journal of education studies*, 7(3), 187-198.
<http://dx.doi.org/10.6084/ejes.v0i0.3008>
- Trouche, L., Gueudet, G. (2010). *Approche documentaire du didactique*, JDIES – Lyon, 24 et 25 novembre 2010.
- Varenne F. (2012). Epistémologie des modèles et des simulations : tour d'horizon et tendances. <hal-00674144, version 1->.

Creative Commons licensing terms

Author(s) will retain the copyright of their published articles agreeing that a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) terms will be applied to their work. Under the terms of this license, no permission is required from the author(s) or publisher for members of the community to copy, distribute, transmit or adapt the article content, providing a proper, prominent and unambiguous attribution to the authors in a manner that makes clear that the materials are being reused under permission of a Creative Commons License. Views, opinions and conclusions expressed in this research article are views, opinions and conclusions of the author(s). Open Access Publishing Group and European Journal of Education Studies shall not be responsible or answerable for any loss, damage or liability caused in relation to/arising out of conflicts of interest, copyright violations and inappropriate or inaccurate use of any kind content related or integrated into the research work. All the published works are meeting the Open Access Publishing requirements and can be freely accessed, shared, modified, distributed and used in educational, commercial and non-commercial purposes under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).