

Difficultés d'apprentissage du concept d'oxydoréduction

par M. SOUDANI, D. CROS et D. CACHAU-HERREILLAT
Études et Recherches sur l'Enseignement Scientifique
L.R.D.S. - Case 39 - Université Montpellier II
Place Eugène Bataillon - 34095 Montpellier

Première partie

RÉSUMÉ

Cette recherche a pour but de faire le bilan des acquis des élèves de sections scientifiques entrant en première année universitaire sur le concept d'oxydoréduction, et de localiser les sources des difficultés qu'ils rencontrent à ce propos. Cela nous a semblé d'autant plus important que les capacités acquises dans l'enseignement secondaire serviront de base pour l'enseignement supérieur.

Les données utilisées dans ce travail ont été recueillies au cours de l'année universitaire 1994/1995 auprès de deux cent trente-trois étudiants de première année universitaire (section scientifique) avant qu'ils abordent l'oxydoréduction à ce niveau... Les étudiants sondés sont issus de l'enseignement des programmes de 1986 [1]. Le résultat de cette recherche a montré que la plupart des étudiants méconnaissent (ou ont oublié) le concept d'oxydoréduction, le réseau conceptuel qui lui est associé et son champ d'application.

On s'aperçoit également que les étudiants préparant le C.A.P.E.S., c'est-à-dire en licence ou en maîtrise, sont loin de maîtriser toutes les capacités de base relatives à ce thème.

1. INTRODUCTION

«Quand on cherche les conditions psychologiques des progrès de la science, on arrive bientôt à cette conviction que c'est en termes

d'obstacles qu'il faut poser le problème de la connaissance scientifique»... [2].

De nombreux travaux, dans le domaine de la didactique de la chimie, se sont intéressés aux difficultés des élèves quant à l'acquisition des concepts de base (atome, électron, acide/base, réactions chimiques...). Le concept d'oxydoréduction est largement abordé dans l'enseignement (directement ou indirectement) tant au niveau collège qu'au niveau lycée et à l'université. Il pose bien des problèmes aux élèves. Cela explique les nombreuses études entreprises sur ce concept. [3 à 11].

Concept clé de la chimie, l'oxydoréduction se présente comme une charnière entre l'enseignement secondaire, où il marque l'une des pierres d'achoppement des classes de première et terminale, et l'enseignement supérieur où il fournit l'une des premières causes de consternation aux enseignants. Si l'on s'en tient aux instructions officielles des anciens programmes [1], on est en droit d'attendre des étudiants qu'ils connaissent la définition des termes oxydant et réducteur, oxydation et réduction, les règles permettant de calculer le nombre d'oxydation d'un élément, et, en utilisant les nombres d'oxydation, de reconnaître si une réaction est une réaction d'oxydoréduction.

Le travail que nous présentons ici tente d'apporter quelques éléments de réponse aux questions suivantes :

- A quel degré (point) les étudiants entrant à l'université maîtrisent-ils le concept d'oxydoréduction ?
- Les objectifs du programme officiel [1] ont-ils été partiellement ou totalement atteints ?
- Dans le cas où ce concept ne serait pas (ou serait mal) maîtrisé quels sont les obstacles qui peuvent être à l'origine des difficultés ?

2. MÉTHODOLOGIE

Nous avons tenté de répondre à nos interrogations par l'intermédiaire d'un questionnaire constitué par :

- *Des questions fermées* : le dépouillement est plus rapide [12] car elles limitent les possibilités de réponse ;
- *Des questions ouvertes* : les personnes interrogées sont libres de répondre comme elles le veulent sans être influencées par aucune

proposition. Ces questions apportent une grande variété de réponses y compris celles auxquelles on ne s'attendait pas.

Les questions ont été formulées en tenant compte, d'une part des objectifs du programme [1], d'autre part de questionnaires proposés précédemment par d'autres enseignants [3 à 14]. Elles correspondent à trois niveaux de complexité croissante et ont porté précisément sur :

– **Niveau I : Mémorisation**

L'étudiant doit être capable de se rappeler des définitions de : oxydation, réduction, oxydant, réducteur, degré d'oxydation et de reconnaître des phénomènes qui lui ont été exposés tout au long du cycle parcouru.

– **Niveau II : Application et compréhension**

L'étudiant doit être capable d'appliquer des règles et d'interpréter les résultats à partir des définitions et de quelques notions abstraites. Par exemple l'élève doit connaître les règles permettant de calculer le nombre d'oxydation d'un élément. Cette notion sera utilisée pour repérer l'oxydation ou la réduction d'un élément.

– **Niveau III : Analyse et synthèse**

L'étudiant doit être capable de résoudre des problèmes d'analyse et de synthèse faisant appel aux deux niveaux précédents.

Pour éviter que les étudiants ne répondent au hasard (lorsqu'ils ignorent la bonne réponse) nous avons proposé l'item «je ne sais pas» dans toutes les questions à choix multiples [15 et 7]. L'exploitation des pourcentages de réponses «je ne sais pas» permet de différencier trois types de résultats [7 et 16].

1 - Les élèves connaissent la bonne réponse : les pourcentages de bonnes réponses sont élevés et ceux de «je ne sais pas» sont faibles.

2 - Les élèves sont conscients de ne pas connaître la bonne réponse : les pourcentages de «je ne sais pas» sont élevés et ceux des réponses exactes sont faibles.

3 - Les élèves donnent une réponse erronée tout en la croyant correcte : les pourcentages des réponses fausses sont élevés et ceux de «je ne sais pas» sont faibles.

3. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

3.1. Définitions : *oxydation et réduction*

Les questions à choix multiples concernant ces deux définitions ont été posées séparément, dans deux questionnaires différents afin que les étudiants ne puissent extrapoler, ceci nous permettant de faire des corrélations entre les diverses réponses et de voir si, éventuellement, ces étudiants connaissent l'une des définitions mieux que l'autre.

Les deux questions ont été posées séparément sous la forme suivante :

L'oxydation d'un élément est :

- Un gain d'électrons
- Un gain d'oxygène
- Une perte de protons
- Un gain de protons
- Une perte d'électrons
- Une perte d'oxygène

La réduction d'un élément est :

- Un gain d'électrons
- Un gain d'oxygène
- Une perte de protons
- Un gain de protons
- Une perte d'électrons
- Une perte d'oxygène

Les pourcentages de réponses proposées dans les deux questions sont regroupées dans les histogrammes suivants (figures 1 et 2).

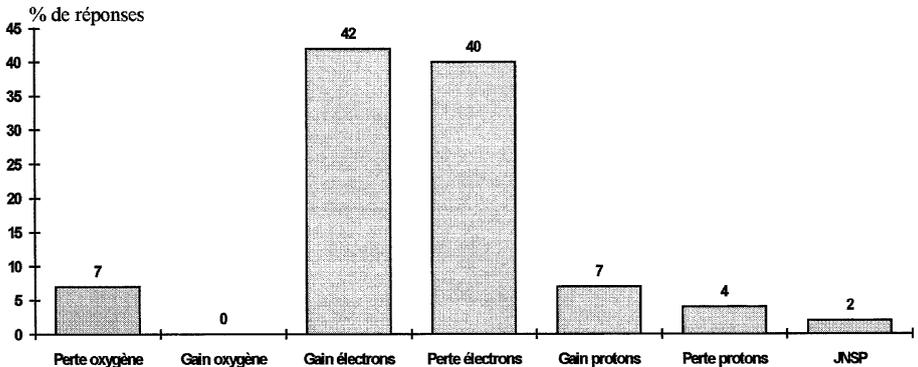


Figure 1 : Réponses relatives à la définition de réduction.

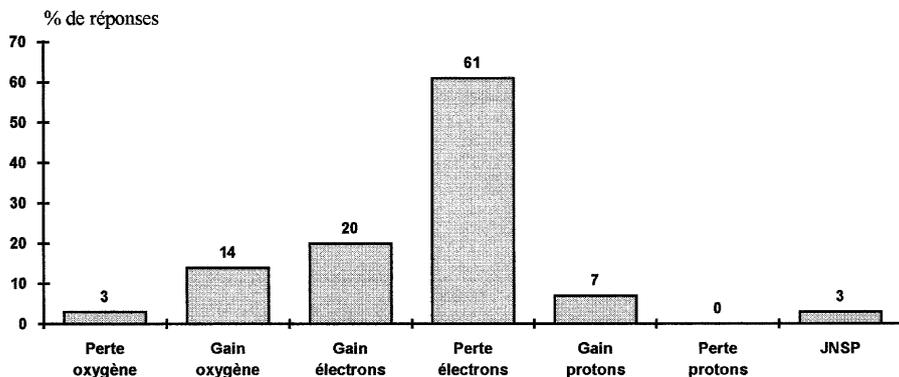


Figure 2 : Réponses relatives à la définition de oxydation.

De prime abord, nous remarquons que le pourcentage de réponses «je ne sais pas» dans les deux questions n'excède pas 3 % : ce qui laisse supposer que les étudiants interrogés sont sûrs de connaître la bonne réponse.

Cependant, comme le montre la figure 1, l'équivalence des aires (42 % en gain d'électrons et 40 % en perte d'électrons) montre une méconnaissance de la définition de la réduction d'un élément.

Quant à l'oxydation, nous remarquons d'après la figure 2 que le pourcentage de bonnes réponses (61 %) est nettement supérieur ; nous pouvons conclure qu'une large majorité d'étudiants semblent mieux connaître la définition de l'oxydation que celle de la réduction. En fait, pour le mot réduction, les étudiants perçoivent les définitions comme étant contradictoires parce qu'ils se réfèrent probablement au sens commun de ce terme. Dans l'ensemble, une corrélation entre les deux résultats (figures 1 et 2) montre que 82 % des étudiants savent que dans l'oxydation et la réduction il y a quelque part un échange d'électrons, mais apparemment sans pouvoir en préciser le sens...

On pourrait se demander si les étudiants raisonnent par rapport au sens commun des termes «réduction», «gain» et «perte» dans le langage courant. On peut alors penser que les étudiants associent «réduction» et «perte-diminution» alors que, au sens du chimiste, c'est un «gain» de quelque chose de négatif : l'électron. Les étudiants raisonnent en terme de «gain» et de «perte» d'électrons mais oublient probablement que, les électrons étant chargés négativement, le fait de **perdre/gagner**

des électrons se traduit par un **accroissement/diminution de charge**. Nous pensons que la confusion peut naître dès les leçons introductrices de ce concept. En effet, les premières réactions présentées aux élèves en première S sont «l'oxydation des métaux par des solutions ioniques» au cours de laquelle le métal oxydé voit sa charge **augmenter** (formation d'un ion positif) en **perdant** des électrons.

L'étudiant a donc du mal à associer réduction et gain d'électrons. En 1981, J.D. HERRON [17] remarquait «qu'il est clair que les idées associées au mot réduction sont à l'opposé de la définition correcte en gain d'électrons. Les chimistes comprennent bien sûr l'origine de ces termes, mais cela n'aide pas l'étudiant qui se débat pour mémoriser la grande variété de mots nouveaux introduits dans le cours relatif à ce concept». L'enseignement de ce concept entraîne l'introduction d'une quarantaine de mots et formulations nouveaux dans les chapitres correspondants dans les manuels de chimie de première S [18] et [19].

Ce type de problème auquel les étudiants sont sérieusement confrontés peut aussi être mis en évidence par le traitement des réponses à la question suivante :

Au cours d'une réaction d'oxydoréduction :

- L'oxydant est oxydé
- L'oxydant est réduit
- Le réducteur est réduit
- Le réducteur est oxydé

Pour 85 % des étudiants, l'oxydant est réduit alors que le réducteur est oxydé pour 63 % seulement. De plus, la question appelle deux réponses et une étude de corrélation entre les réponses montre que 54 % seulement des étudiants ont répondu simultanément par les deux items : l'oxydant est réduit et le réducteur est oxydé.

Ces résultats permettent de dire que beaucoup d'étudiants (la moitié de la population testée) ont une représentation de non-interdépendance de l'oxydation et de la réduction. Quelle pourrait être l'origine de cette représentation ?

L'examen de quelques manuels scolaires de première S nous a révélé que les méthodes employées pour introduire le concept d'oxydoréduction décrivent séparément, dans un premier temps, des expériences d'oxydation et de réduction. Cette méthode de travail pourrait

être à l'origine de la difficulté d'associer oxydation et réduction dans le même phénomène même si, par la suite, les auteurs couplent ces deux phénomènes et mettent en évidence leur complémentarité.

D'autre part, d'après les figures 1 et 2, on remarque qu'il y a des réponses qui mettent en jeu l'échange de protons, ce qui fait penser aux problèmes posés par l'écriture des équations-bilans de réactions redox en solutions aqueuses et en milieu acide. En effet, pour écrire les équations de demi-réactions (l'écriture directe des équations-bilans, et l'utilisation des nombres d'oxydation à cet effet étant hors programme) on est souvent amené à «ajouter» des protons (H^+) pour équilibrer l'équation, ce qui laisse supposer aux élèves qu'ils font partie du phénomène d'oxydoréduction.

3.2. Définition : *nombre d'oxydation*

Nous avons demandé aux étudiants, sous forme de question ouverte, de «donner la définition du nombre d'oxydation d'un élément». Dans leurs réponses, les étudiants ont manifesté une presque totale méconnaissance de cette notion.

En effet,

- 64 % n'ont donné aucune réponse ;
- 20 % des étudiants donnent des réponses diverses telles que :
«il est indiqué en chiffre romain après le nom du complexe»
«facilité à s'oxyder par rapport au carbone ; C (I)»...
- 12 % le définissent en termes de perte ou de gain d'électrons (5 % en terme de capacité d'un élément à gagner des électrons et 7 % en terme de capacité à en perdre).

On ne trouve que 4 % environ de réponses proches de la réponse attendue. Ce résultat est en fait prévisible étant donné que les étudiants auxquels nous avons passé le questionnaire ont suivi l'ancien programme de 1986 [1] ; on pourrait aussi penser au facteur d'oubli vu le temps qui sépare ce test et le dernier cours qu'ont eu ces élèves sur l'oxydoréduction, d'autant plus que cette notion n'était abordée que tardivement en première S et de manière rapide.

Reste à savoir si les étudiants qui méconnaissent la définition du nombre d'oxydation, sont néanmoins capables d'utiliser cette notion ?

3.3. Calcul du nombre d'oxydation

Une question a été posée à propos du calcul du nombre d'oxydation de l'élément soufre (S) dans quatre combinaisons chimiques différentes (S_8 ; SO_2 ; SO_4^{2-} et $S_2O_8^{2-}$). Les réponses obtenues montrent que seulement 11 % des étudiants sont capables de mener à bien ce calcul. Ce résultat met en lumière le fait que cette notion fondamentale n'est pas si facile à acquérir qu'on pourrait le croire du fait qu'il s'agit d'un «calcul mathématique».

Par ailleurs, nous avons constaté, suite à un examen de copies d'élèves de première S (devoirs sur la partie oxydoréduction) de l'année scolaire 1993/1994 que lors des contrôles qui suivent immédiatement l'enseignement en classe de première, les élèves n'éprouvent pas de difficultés particulières à calculer le nombre d'oxydation d'un élément. Pourquoi n'en sont-ils plus capables à l'entrée à l'université ?

Comme on le constate dans d'autres domaines de l'enseignement, cela laisse supposer que la mémorisation de ces définitions est de courte durée et ne sert qu'à une réussite au contrôle immédiat, ce qui nous semble l'unique préoccupation des élèves dans la plupart des cas (hypothèse qui peut faire l'objet d'une étude afin de la mettre à l'épreuve et de connaître l'intérêt et la motivation des élèves pour les concepts qu'on leur enseigne).

3.4. Variation du nombre d'oxydation

Nous avons proposé aux étudiants la question :

Un élément qui est réduit voit son nombre d'oxydation :

- Augmenter
- Diminuer
- Rester constant
- Je ne sais pas

Les réponses obtenues sont regroupées dans l'histogramme de la figure 3.

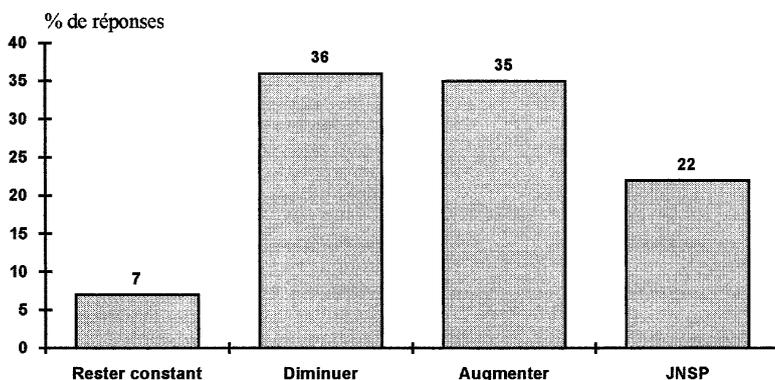


Figure 3 : Histogramme. Répartition des pourcentage suivant les items choisis.

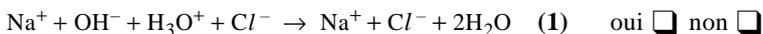
D'après ce résultat, le pourcentage de «je ne sais pas» (22 %) pourrait laisser penser que les 78 % autres connaissent la bonne réponse. En fait seulement 36 % savent que le nombre d'oxydation d'un élément diminue lors de sa réduction ; les autres (42 %) croient la connaître puisqu'ils donnent une réponse fautive (35 % pensent que le nombre d'oxydation d'un élément augmente lors de sa réduction et 7 % qu'il reste constant).

La plupart des étudiants (71 %) sont conscients que le nombre d'oxydation varie, mais seulement 36 % donnent le sens correct de variation, du moins dans le cas de la réduction. La même question posée dans le cas de l'oxydation pourrait permettre de vérifier ce résultat.

3.5. Utilisation du nombre d'oxydation

La question que nous avons posée à ce propos fait implicitement appel à une utilisation du nombre d'oxydation. Elle a été formulée comme suit :

«Parmi les réactions suivantes, identifier celles qui correspondent à une oxydoréduction» :



Pourquoi ?



Pourquoi ?



Pourquoi ?



Pourquoi ?

L'équation (1) représente une réaction d'oxydoréduction pour 24 % des étudiants, cependant ils ne donnent pas tous des justifications. Le résultat obtenu est donné dans le tableau 1.

OUI		NON
Sans justification	Avec justification	Sans justification
19 %	5 %	76 %

Tableau 1

Les justifications avancées par les étudiants pour la réponse «oui» sont les suivantes :

«car il y a échange d'électrons» ;
 «perte de protons» ;
 «il y a une oxydation et une réduction»...

Les réponses concernant l'équation (2) sont consignées dans le tableau 2.

OUI		NON
Sans justification	Avec justification	Sans justification
28 %	19 %	53 %

Tableau 2

Les justifications données sont regroupées dans le tableau 3.

Justifications	Pourcentages calculés par rapport au nombre de justifications
Échange d'électrons Déplacement de charges	55 %
Couples $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ et $\text{OH}^-/\text{H}_2\text{O}$ $\text{NH}_3 \rightarrow \text{NH}_4^+ + 1e^-$ et $\text{H}_2\text{O} + 1e^- \rightarrow \text{OH}^- + \text{H}^+$	27 %
Il y a oxydation et réduction	9 %
Échange de protons	9 %

Tableau 3

Les réponses obtenues en ce qui concerne les autres équations (tableau 4) permettent une interprétation plus fine des résultats.

L'équation	Est une oxydoréduction	N'est pas une oxydoréduction
(3)	9 %	91 %
(4)	3 %	97 %

Tableau 4

La quasi totalité des étudiants interrogés (91 % pour l'une et 97 % pour l'autre) n'identifie pas ces équations à des réactions d'oxydoréduction.

En supposant que l'acquisition d'un concept permet, entre autres, à un élève de distinguer entre exemple et contre exemple, nous pouvons déduire des résultats précédents que la notion de nombre d'oxydation n'est pas maîtrisée. En effet, nous avons noté que les quelques justifications données ne font pas référence à cette notion. Il serait particulièrement intéressant de comparer ces résultats à ceux que l'on pourrait obtenir en donnant comme consigne d'utiliser le nombre d'oxydation.

Par ailleurs, en comparant les résultats obtenus pour les équations (1) et (2) à ceux obtenus pour les équations (3) et (4), nous pouvons conclure que, pour ces étudiants :

- la présence d'oxygène dans une réaction chimique (réaction (3) et (4)) n'est pas mise en relation avec la notion d'oxydoréduction. L'oxygène n'est pas reconnu comme oxydant ;
- la présence d'entités chargées dans une réaction chimique (réaction (1) et (2)) est largement associée à la notion d'oxydoréduction ;
- pour une faible proportion d'étudiants, la présence d'entités chargées correspond à un échange d'électron ainsi que M.S. MEDIMAGH et M.L. BOUGUERRA [7] l'ont déjà constaté. Il existerait ainsi des couples redox tels que « NH_4^+/NH_3 » et « OH^-/H_2O ».

Ces conceptions, ou absence de conceptions (pour le cas de l'oxygène par exemple), pourraient avoir comme origine des non-dits ou des dits mal explicités dans l'enseignement tels que l'origine des protons, la signification des électrons dans une équation de demi-réaction, perte d'un côté et gain de l'autre, ... Ce qui peut constituer des obstacles majeurs à l'apprentissage.

Dans l'enseignement de ce concept au niveau secondaire, on attache beaucoup d'importance au gain et à la perte d'électrons, ce qui confirme les propos de J.D. HERRON [17] pour qui «les enseignants qui définissent oxydation et réduction en termes de perte ou de gain d'électrons attribuent normalement des nombres d'oxydation aux éléments, mais continuent à se concentrer sur le transfert d'électrons. C'est inutile et cela conduit à une confusion de plus».

Doit-on partager l'idée de K. SCHUNG et coll. [20] pour qui la définition de l'oxydoréduction en terme de variation du nombre d'oxydation suppose l'attribution artificielle et arbitraire de certains nombres aux éléments ? «Cela incite l'étudiant à envisager tout le concept des réactions d'oxydoréduction comme n'ayant aucun rapport avec la réalité, mais simplement comme une combinaison fortuite de facteurs permettant de jouer à un jeu».

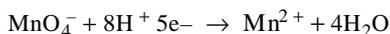
On pourrait donc se demander s'il faut définir l'oxydoréduction comme échange d'électrons ou comme variation du nombre d'oxydation de quelques éléments de la réaction ? Pour notre part, nous pensons qu'il ne faut négliger ni l'une ni l'autre des deux définitions. Elles sont toutes deux indispensables à la compréhension du phénomène d'oxydoréduction bien que leur contradiction apparente soit un obstacle à l'intégration du concept (gagner quelque chose et se trouver avec un chiffre plus petit ; perdre quelque chose et se trouver avec un chiffre plus grand).

4. CONCLUSION

Le concept d'oxydoréduction est reconnu comme l'un des concepts les plus difficiles en chimie [21, 22 et 23]. Les raisons sont multiples.

- En chimie, la réduction signifie un gain (d'électrons) alors que dans le langage de tous les jours, le fait de gagner n'implique pas une réduction, bien au contraire.
- Le transfert d'électrons n'est pas mis en évidence dans toutes les réactions.
- Comme le soulignent D. KOLB (1978) et V. RINGNES (1995), «Les électrons ne sont pas "réellement transférés" dans les réactions redox de tous les jours» (exemple : $C + O_2 \rightarrow CO_2$) [9 et 11].

– «L'incertitude survient quand on doit identifier ce qui est réduit et ce qui est oxydé : considérons par exemple la réduction :



est-ce que c'est KMnO_4 , MnO_4^- , Mn^{7+} ou Mn^{VII} qui est réduit ?» [11].

– La présence d'entités chargées dans les équations de réactions perturbent les élèves : l'apparition/disparition de formes ioniques dans l'équation ne signifie pas forcément que celle-ci représente une réaction redox. En plus des résultats que nous avons nous-mêmes trouvés, V. RINGNES (1995) fait remarquer qu'un accroissement de charge totale des ions n'est pas toujours accompagné d'une oxydation, les élèves pensent qu'il y a un changement de l'état d'oxydation du carbone de $-II$ à 0 dans l'équation : $\text{CO}_3^{2-} + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ et conçoivent alors ceci comme une oxydation [8 et 11].

Ces difficultés sont pratiquement toutes liées au modèle électronique de l'oxydoréduction. Comme partout dans la science, un seul modèle ne permet pas toujours d'expliquer tous les phénomènes s'attachant à une théorie, il se trouve alors qu'au sein d'une seule théorie il existe deux ou plusieurs modèles qui se complètent. Dans le cas de l'oxydoréduction, le pouvoir explicatif du modèle électronique est limité. N'ayant eu que l'enseignement de ce dernier modèle, les élèves paraissent alors incapables de répondre correctement à certaines questions.

V. RINGNES (1995) a montré que les élèves n'utilisant que ce modèle ne réussissaient pas à des tests «banals», ce modèle ne leur a pas été d'un grand secours comme le montre cette étude. Cet auteur et d'autres [10, 24 et 25], ont mis en évidence la limite du modèle électronique et la «supériorité» du modèle du nombre d'oxydation. Si dans cette étude nous mettons en évidence la nécessité du modèle du nombre d'oxydation, nous ne nions pas l'utilité du modèle électronique : ces deux modèles sont complémentaires. Par ailleurs, «par une approche de complémentarité, les élèves comprendraient que les concepts scientifiques sont des constructions de l'esprit et que la progression en science n'est pas une simple expansion de la connaissance mais plutôt qu'elle requiert des modifications, des révisions et parfois des renversements et abandons d'idées [11]. (Sur ce dernier point, consulter aussi Serge LE STRAT : «*Épistémologie des sciences physiques*», éditions Nathan, 1990).

Cette étude montre l'intérêt et l'utilité de la notion de nombre d'oxydation. En fait, la meilleure façon de prouver l'importance de quelque chose est de montrer comment et combien sa présence fait défaut. C'est pourquoi il nous a paru intéressant de prolonger ce travail dans le cours de l'année universitaire 1996/1997 par une étude analogue et comparative qui tienne compte des modifications des objectifs assignés aux programmes quant à la notion de nombre d'oxydation. Une étude auprès d'étudiants de licence est en cours pour, de la même manière, faire le bilan de leurs acquis après deux ans d'université.

Dans cette étape, nous espérons que les résultats recueillis soient susceptibles de faciliter une meilleure prise de décisions pédagogiques, contribuant ainsi à former des instruments d'autorégulation.

Nous pouvons conclure que si l'enseignement ne tient pas compte des difficultés rencontrées par les élèves, ces derniers cherchent spontanément des raccourcis pour trouver des solutions et des moyens, certes éphémères, leur permettant de réussir aux contrôles de connaissances immédiats après avoir décodé, à leurs façons, les attentes du professeur [26].

BIBLIOGRAPHIES

- [1] Bulletin Officiel (Supplément du n° 21 - 2 juin 1988), «*Programme des classes de première et des classes terminales des lycées d'enseignement générales et technologique. Disciplines scientifiques*», Paris, Ministère de l'Éducation Nationale.
- [2] G. BACHELARD : «*La formation de l'esprit scientifique*», quatorzième édition, Paris, Vrin, 1986.
- [3] A. DORGE : «*Oxydoréduction : du concept à l'expérimentation*», T.E.R. Université Montpellier II, 1993.
- [4] M. ERRADI, M. KHALDI, S. EZZAHRI et A. DUMON : «*Le concept "oxydoréduction". Un essai d'identification et d'analyse des difficultés conceptuelles*», Actes du colloque franco-maghrébin de didactique de la chimie, Faculté des Sciences Dhar El Mehrz Fès, pp. 131-135, octobre 1993.
- [5] B. JEANJEAN : «*Stop à la réduction de la chimie !!! ou recherche sur les représentations des étudiants à l'entrée de l'université : L'oxydoréduction*», Covalence, 2, pp. 24-29, mai 1987.

- [6] B. JEANJEAN, D. CACHAU-HERREILLAT et D. CROS : «*L'oxydoréduction vue par les étudiants du premier cycle*», Actes des XIII^{es} Journées Internationales sur la Communication, l'Éducation et la Culture Scientifiques et Industrielles, Chamonix, pp. 616-617, 1991.
- [7] M.S. MEDIMAGH et M.L. BOUGUERRA : «*Évaluation formative de l'enseignement d'un concept de base en chimie dans les établissements de l'enseignement secondaire*», B.U.P. n° 744, pp. 789-801, mai 1992.
- [8] Pamela J. GARNETT, Patrik J. GARNETT et F. DAVID : «*Implication of research on students' understanding of electrochemistry for improving science curricula and classroom practice*», Int. J. Sc Educ. Vol. 12, n° 2, pp. 147-155, 1990.
- [9] D. KOLB (1978) «*The chemical equation. Part. II : Oxydation-reduction reactions*». J. Chem. Educ. n° 55, pp. 326-331.
- [10] H.H. SISLER et C.A. VANDERWELF : «*Oxydation-reduction. An example of chemical sophistry*», J. Chem. Educ. n° 57 (1), pp. 42-44, 1980.
- [11] V. RINGNES : «*Oxydation-reduction-learning difficulties and choice of redox models*», SSR, 77, (279), décembre 1995.
- [12] Olympiades nationales de la chimie, Union des physiciens, 75, boulevard Saint-Michel - 75270 PARIS Cedex 06, 1985.
- [13] Olympiades nationales de la chimie, 1986.
- [14] Olympiades nationales de la chimie, 1989.
- [15] F. DE SINGLY : «*L'enquête et ses méthodes : le questionnaire*», Éditions Nathan, Paris, 1992.
- [16] M. CHASTRETTE : «*L'actualité chimique*», cité par les auteurs [7], 1978.
- [17] J.D. HERRON : «*Qu'est-ce que l'oxydation ?*», Tendances nouvelles de l'enseignement en chimie, Vol. V, Presses de l'UNESCO, pp. 208-211, 1981.
- [18] G. FONTAINE, A. TOMASINO, F. GILLES et A. GILLES : «*Chimie premières S.E.*», Éditions Nathan, 1991.
- [19] A. CROS et C. MOREAU : «*Chimie première S.E.*», Collection Cros, 1988.
- [20] K. SCHUG, J. KOELLNER, G. LOVERIDGE et J.A. JANKE : «*Le lion rugit : Réponses à "Qu'est-ce que l'oxydation ?"*», Tendances

nouvelles de l'enseignement de la chimie, Vol. V, Presses de l'UNESCO, pp. 212-214, 1981.

- [21] A.H. JOHNSTONE, T.I. MORRISON et D.W.A. SHARP : «*Topic difficulties in chemistry*», Educ Chem, 1971, 9, pp. 212-3 and 218, (cité par [11]), 1971.
- [22] A.H. JOHNSTONE : «*Evaluation of chemistry syllabuses in Scotland*», Stud Sci Educ, 1974, 1(1), pp. 21-49. (cité par [11]).
- [23] B. BATTS et SMITH, Austr Sci teachers J, 1987, 32(4), p. 45 (cité par [11]).
- [24] C.A. VANDERWELF, A.W. DAVIDSON et H.-H. SISLER : «*Oxydation-reduction : a re-evaluation*», J. Chem. Educ., 1948, 25, pp. 405-6 (cité par [11]).
- [25] C.A. VANDERWELF : «*Aconsistent treatment of oxydation-reduction*», J. Chem. Educ., 1948, 28, pp. 547-51 (cité par [11]).
- [26] G. BROUSSEAU : «*Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques*», Recherche en didactique des mathématiques, Vol. 7.2, La pensée sauvage éditions, 33-115, 1986.