

Réflexions post-bac

par M. GOFFARD

LIREST - GDSEP7 - Université de Paris VII

Lycée Henri IV - 75005 Paris

Comme beaucoup de mes collègues, en juin 1993, «j'étais de bac» ; la lecture des copies m'a interrogée. Une impression d'incohérence se dégageait des réponses des élèves, de manière répétée. Pour dépasser cette impression, ne pas en rester au verdict simpliste : «ils n'ont rien compris», j'ai essayé d'aller un peu plus loin en relevant, en un temps assez court, un certain nombre de données qui concernent un exercice de chimie portant sur les acides et les bases, posé en Terminale C (l'énoncé figure en annexe 1).

1. LES ÉLÉMENTS ATTENDUS DANS LA RÉPONSE

Dans la première question, il s'agit de dire que :

- la solution S_1 contient :
 - les ions H_3O^+ et les ions OH^- car, en solution aqueuse, on peut écrire :



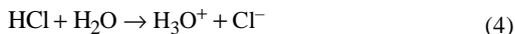
- les ions éthanoate et sodium car par dissociation et solvation on a :



- des molécules d'acide éthanoïque car les ions éthanoate réagissent sur l'eau en tant que base faible :



- la solution S_2 contient :
 - les ions H_3O^+ et OH^- suivant (1),
 - les ions chlorure car le chlorure d'hydrogène se dissout totalement et réagit sur l'eau :



Dans la deuxième question, la réaction qui a lieu, n'est pas demandée et l'on demande de calculer les concentrations molaires des différentes espèces en solution.

2. LE MODE D'ANALYSE DES COPIES

Les 101 copies que j'ai corrigées correspondent à un échantillon que l'on peut considérer comme représentatif ; la moyenne des 102 copies corrigées par le collègue du même jury était identique à la mienne : 10,96. La moyenne de l'épreuve était dans l'académie aux environs de 11. (Compte tenu du nombre de copies corrigées nous assimilerons les nombres à des pourcentages).

J'ai, dans les copies corrigées :

- recherché les cohérences entre les éléments de réponses qualitatives, c'est-à-dire que j'ai mis en regard les espèces citées par les candidats et les justifications qu'ils apportent,
- regardé la corrélation entre les réponses qualitatives de la première question et quantitatives de la deuxième.

A partir des constatations faites, j'ai tenté une organisation des difficultés rencontrées par les élèves en fonction des concepts sous-jacents mis en jeu. J'ai émis l'hypothèse qu'une même incompréhension d'une notion de chimie pouvait s'exprimer différemment et conduire à des erreurs différentes ; j'ai tenté de rechercher cette cause commune. Ce regroupement des difficultés donne quelques indications sur des obstacles importants rencontrés par les élèves dans l'élaboration de leurs connaissances en chimie.

3. RÉSULTATS OBSERVÉS

La première constatation que l'on peut faire est que les élèves ont, dans l'ensemble, essayé de faire l'exercice : 3 seulement ne répondent pas à la première question et 13 ne dépassent pas le calcul des concentrations en ions H_3O^+ et OH^- ; mais l'exercice n'est pas vraiment réussi par les élèves, en effet :

- 2 élèves (2 %) réussissent totalement l'exercice, c'est-à-dire qu'ils écrivent correctement les 4 équations demandées, nomment les espèces, font les calculs justes,

– 20 élèves, nomment les espèces dans la première question et font les calculs dans la deuxième, les équations demandées n'étant pas toujours écrites.

Ce qui interroge est l'écart suivant :

– 4 élèves seulement nomment correctement les espèces présentes en justifiant leurs affirmations par les équations demandées (sur les quatre, deux feront l'exercice totalement),

– 41 élèves font tous les calculs justes dans la deuxième question, même s'ils répondent à la première question de manière incorrecte.

Ainsi, 41 % des élèves sont capables de faire les calculs des concentrations des espèces mises en solution mais ne disent pas toujours quelles sont ces espèces et n'écrivent pas les équations de réactions. Il est possible d'affirmer que : calculer les concentrations sous entend que les espèces sont présentes. Cela ne va pas de soi si l'on étudie les réponses à la première question concernant les espèces présentes et les équations explicatives données par les élèves ; par ailleurs, les résultats aux calculs sont donnés sans commentaire notamment sur les ordres de grandeurs.

Les résultats obtenus par nos élèves sont à rapprocher de ceux rapportés dans le **Journal of Chemical Education** ; une discussion a eu lieu dans cette revue entre 1987 et 1990, qui se poursuit encore [1]. En 1987 (n° 64) plusieurs articles insistent sur la possibilité et la nécessité d'enseigner des algorithmes de résolution de problèmes de chimie, c'est-à-dire un ensemble de règles qui doit être appris et qui, correctement appliqué à un problème approprié, standard, mène automatiquement à une solution du problème. En 1990 (n° 67), par contre, trois articles font état de recherches montrant qu'enseigner des algorithmes de résolution ne suffit pas ; les élèves savent résoudre des problèmes de type algorithmique sans que pour autant les concepts de base de la chimie soient acquis.

4. INDICATIONS SUR QUELQUES DIFFICULTÉS

On peut penser que les élèves n'ont pas appris leur cours, n'ont pas les connaissances nécessaires, qu'ils écrivent n'importe quoi sans réfléchir ; mais lorsque les réponses sont récurrentes, touchent un nombre non négligeable d'élèves et rejoignent les résultats de recherches menées dans d'autres pays, cette réponse simpliste ne suffit pas et

il est nécessaire de s'interroger plus avant. En même temps, les analyses ci-dessous, ne sont qu'indicatives, elles peuvent nous alerter mais sont insuffisantes à elles seules, il importe de réfléchir davantage.

4.1. Quelle est la signification de l'équation-bilan d'une réaction chimique ?

Lorsqu'un professeur de chimie écrit une équation de réaction telle que les équations (2) ou (4), traduisant la dissolution de l'éthanoate de sodium et du chlorure d'hydrogène dans l'eau, il sous entend que l'éthanoate de sodium ou le chlorure d'hydrogène ont totalement réagi lors de la dissolution dans l'eau et se sont transformés, que les espèces $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Na}$ et HCl ne sont plus en solution, mais qu'il y a eu réaction chimique ; d'autres espèces sont apparues : les ions CH_3CO_2^- , Cl^- , H_3O^+ , et Na^+ . Il semble que tous les élèves ne comprennent pas la symbolisation de l'équation de réaction ainsi. Il y a 23 élèves qui :

- écrivent les équations (2) et (4) correctement mais citent comme espèces encore en solution, l'éthanoate de sodium et les molécules de chlorure d'hydrogène,
- écrivent l'équation (3) (qui traduit la réaction de l'ion éthanoate avec l'eau) comme étant une réaction totale mais n'indiquent pas la présence de molécules d'acide éthanoïque dans la solution ou encore indiquent la présence d'ions éthanoate en solution.

Au delà de la question de symbolisation, c'est la signification même de la réaction chimique qui est en jeu.

Différentes recherches en didactique de la chimie [2] et [3] montrent que cette notion fondamentale n'est pas acquise par beaucoup d'étudiants, même «chimistes» (voir annexe 2).

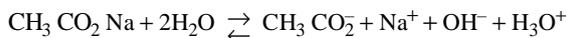
4.2. Quelle différence entre une réaction totale et une réaction partielle ?

- Les équations (1) et (3) (qui traduisent des équilibres chimiques) signifient que les différentes espèces qui participent à la réaction, coexistent en solution. Ainsi, dans toute solution aqueuse, on peut dire qu'il y a des ions H_3O^+ et OH^- ; mais pour certains élèves (qui écrivent ces équations), la solution d'éthanoate de sodium étant basique ne contient pas d'ions H_3O^+ et celle d'acide chlorhydrique ne contient pas d'ions OH^- ; (certes ces ions sont ultra minoritaires dans S_2 et S_1

respectivement), ces élèves calculeront néanmoins leurs concentrations dans la deuxième question.

D'autres élèves décrivent correctement l'équation (3) et on s'attendrait à ce qu'ils signalent la présence de molécules d'acide éthanóique dans la solution, ce qui n'est pas le cas.

– Qu'est-ce qui différencie une réaction totale d'une réaction partielle ? La question n'est probablement pas élucidée pour ceux qui écrivent dans une même équation la dissociation de l'éthanoate de sodium ou du chlorure d'hydrogène et l'autoprotolyse de l'eau, on trouve par exemple :



ou



– Enfin, plusieurs élèves n'attribuent pas le même statut aux équations (2) et (4). En effet, ces deux équations qui traduisent la dissociation totale de l'éthanoate de sodium et du chlorure d'hydrogène sont toutes deux écrites de manière totale ; mais les élèves citent l'éthanoate de sodium comme espèce présente dans la solution S_1 , alors que le chlorure d'hydrogène n'est pas cité comme présent dans S_2 . Ainsi, le fait que l'ion éthanóate soit une base faible et réagisse sur l'eau le différencie de l'ion chlorure qui est indifférent, les élèves extrapolent les différences ; la dissociation de l'éthanoate de sodium est-elle totale ?

Vingt élèves, différents de ceux considérés précédemment (au 4.1.) commettent une des trois erreurs que je viens de citer et que j'ai regroupées dans ce paragraphe. Six de ces vingt élèves commettent deux de ces erreurs ce qui nous conforte dans l'idée que leur source est commune ; c'est-à-dire que la difficulté porte sur la différenciation entre réaction totale ou partielle et au-delà sur celle d'équilibre chimique.

4.3. Où est la difficulté ?

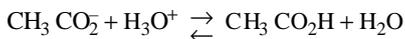
Vingt-sept élèves sont cohérents dans leurs erreurs ; ils traduisent en effet les bilans des équations qu'ils ont écrites ; par exemple certains écrivent les équations (1) et (2) et indiquent comme espèces dans S_1 les

ions CH_3CO_2^- , Na^+ , H_3O^+ , IH^- , d'autres écrivent l'équation (4) et n'indiquent pas d'ions OH^- dans S_2 : ils ne citent que les ions H_3O^+ et Cl^- .

Pourquoi écrivent-ils cela ? Parce qu'ils ont oublié que l'ion éthanoate réagit sur l'eau ? Qu'ils ne savent pas que dans toute solution aqueuse on peut noter la présence des ions OH^- et H_3O^+ ? Parce que là aussi ce sont les équilibres (1) et (3) qui posent problème ? Il n'est pas possible, à mon avis, de trancher ; une recherche plus approfondie serait nécessaire, d'autant plus qu'un certain nombre d'entre eux mèneront les calculs correctement dans la deuxième question et que d'autres commettront des erreurs en écrivant, sans prendre en compte une réaction possible entre les ions éthanoate et hydronium, que la concentration d'une espèce dans le mélange est la somme des concentrations de cette même espèce dans S_1 et S_2 .

Remarque : le bilan des 101 copies s'établit comme suit :

- 23 élèves ont probablement des difficultés avec la notion de réaction chimique,
- 20 (dont 6 commettent deux erreurs) trébuchent sur l'équilibre chimique,
- 27 sont cohérents dans leurs erreurs,
- 19 élèves écrivent la présence de certaines espèces sans justifier par des équations, nous ne pouvons interpréter leurs affirmations,
- 15 énoncent les espèces correctement même si les équations écrites ne correspondent pas aux quatre équations demandées ; on trouve fréquemment, sous cette forme ou sous une forme analogue, l'équation suivante :



Les élèves écrivent cet équilibre sans avoir noté que le milieu était basique,

- 3 élèves enfin ne donnent pas de réponse à la première question.

5. EN GUISE DE CONCLUSION

Les erreurs constatées lors de cette correction sont connues des professeurs enseignant en Terminale. Mais lorsqu'elles apparaissent dans une classe, elles peuvent être considérées comme des difficultés ponctuelles, ne concernant que quelques élèves. Le regroupement des

difficultés en quelques catégories, la recherche d'une origine commune aux différentes erreurs et les pourcentages indiqués permettent de prendre la mesure des incompréhensions qui subsistent chez les élèves de Terminale C. Des concepts fondamentaux de la chimie sont en cause : ceux de réaction chimique et d'équilibre chimique notamment, or certains de ces élèves qui sont en difficulté sur ces notions peuvent mener correctement des calculs de concentrations.

La question que l'on peut alors se poser est bien celle que l'on trouve depuis plusieurs années dans le *Journal of Chemical Education* : faut-il enseigner des concepts ou des algorithmes de calculs ? Les deux certes ! Mais sur quoi faut-il mettre l'accent ? Les élèves doivent-ils savoir faire des calculs ou comprendre ce qu'est une réaction chimique ? Il est clair que la deuxième proposition est fondamentale, les calculs venant après.

L'incompréhension de la réaction chimique est la première difficulté que notre enseignement devrait prendre en compte. Si près d'un quart des élèves qui passent un bac C n'ont pas compris ce qu'est une réaction chimique, il est peut-être inutile de leur enseigner d'autres notions de chimie qui découlent de là. Or agissons-nous ainsi ? En fin de Seconde, comment effectuons-nous la sélection des élèves qui veulent entrer en Première S ? Sur la capacité de ceux-ci à mener à bien des calculs de quatrième proportionnelle. En fait, ne sommes-nous pas en train d'éliminer un certain nombre d'élèves qui pourraient faire des études scientifiques et qui sont rebutés par le côté trop formel de nos disciplines ? Il est certes plus facile d'évaluer la capacité à résoudre des exercices de type calculatoire que d'évaluer la compréhension des concepts mais penser qu'à travers ces exercices de calculs on évalue les deux capacités, ou qu'on évalue des élèves plus « conceptuels » que d'autres est probablement un erreur. Nous ne vérifions généralement pas que les élèves ont compris ce qu'est une réaction chimique (la preuve en est ce quart d'élèves qui en Terminale semble n'avoir toujours pas compris). Il nous faudrait affiner nos modes d'évaluation et diversifier les exercices.

En classe de Seconde, les nouveaux programmes insistent sur la vérification des acquis du collège ; c'est l'objectif premier de la première partie du programme : « chimie dans les champs et les jardins ». Lorsque les élèves arrivent en Seconde, il est possible de partir de ce qu'ils ont déjà appris et de les faire travailler sur ce qu'est une réaction chimique comme le fait A. GOUBE [4]. Il serait, par ailleurs, utile de

faire préciser systématiquement les conditions d'une expérience ou les conditions d'obtention d'un produit (état physique des réactifs et des produits de la réaction, mode opératoire), et de demander la redescription du bilan d'une équation de réaction en termes d'atomes et de molécules. Insister sur ces notions aboutirait peut-être à un meilleur apprentissage de ce qu'est une réaction chimique. S'assurer que les élèves du collège possèdent ces connaissances faciliterait grandement la compréhension du modèle de l'atome introduit ensuite et l'écriture de Lewis des atomes, des molécules et des ions. Avoir des exigences sur des connaissances de type qualitatif et non quantitatif ne traduit pas forcément une baisse de niveau, mais un accent sur ce qui est essentiel et premier. Plus vite nos élèves comprendront ces notions et plus facile sera l'apprentissage du raisonnement en quantité de matière.

De la même façon, qu'est-il important d'enseigner en Terminale ? Une des difficultés de nos élèves ne provient-elle pas du fait que ceux-ci, actuellement, n'étudient essentiellement que des réactions totales ? La réaction d'estérification est abordée en Première, reprise en Terminale et la notion d'équilibre est sous-jacente à l'étude des acides et des bases. Dans l'enseignement notamment n'apparaît pas l'idée fondamentale qu'un équilibre n'est pas un état statique caractérisé par une constante, mais «un équilibre dynamique» que l'on peut déplacer dans un sens ou un autre, en faisant varier les concentrations par exemple. Les élèves n'ont que peu d'occasions de construire le concept d'équilibre chimique et de le différencier de celui de réaction chimique totale. Les évaluer sur la compréhension de ce qu'est une réaction partielle est peut-être une exigence trop élevée. Ne peut-on, par contre, construire des exercices qualitatifs permettant de tester, en fin de second cycle, si les élèves maîtrisent la notion de réaction chimique totale ?

Je remercie A. CARRÉ, M.-C. FEORE, J.-P. FOULON et C. LARCHER, d'avoir accepté la pénible tâche de relire et critiquer cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M.-B. NAKHLEH et R.-C. MITCHELL - (1993), Concept learning versus problem solving, *Journal of Chemical Education*, vol 70 n° 3, 190-192.
- [2] J. LYTHCOTT - (1990), Problem solving and requisite knowledge of chemistry, *Journal of Chemical Education*, vol 67 n° 3, 248-252.
- [3] M.-B. NAKHLEH - (1992), Why some students don't learn chemistry, *Journal of Chemical Education*, vol 69 n° 3, 191-196.
- [4] A. GOUBE - (1990), L'imagination au pouvoir : concept de réaction chimique au collège, B.U.P. n° 726, 923-931.

Annexe 1

Énoncé de l'exercice : mélange de deux solutions

Les solutions seront maintenues à la température de 25°C pendant toutes les expériences.

Le produit ionique de l'eau à cette température est $K_e = 1,0 \times 10^{-14}$.

Tous les résultats numériques seront exprimés avec deux chiffres significatifs.

1. On dispose d'une solution aqueuse S_1 d'éthanoate de sodium (acétate de sodium), de concentration molaire $c_1 = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$ dont le pH est 8,0 et d'une solution S_2 d'acide chlorhydrique, de concentration molaire :

$$c_2 = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1} \text{ dont le pH est } 2,0.$$

Faire l'inventaire qualitatif des espèces chimiques (autres que l'eau) présentes dans chacune des solutions initiales S_1 et S_2 .

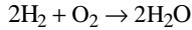
La présence de chaque espèce sera justifiée par l'équation-bilan correspondante.

2. On mélange un volume $V_1 = 20 \text{ mL}$ de la solution S_1 et un volume $V_2 = 20 \text{ mL}$ de la solution S_2 et l'on mesure le pH de la solution S obtenue. Le résultat est : $\text{pH} = 3,5$.

2.1. Calculer les concentrations molaires de toutes les espèces chimiques (autres que l'eau) présentes dans la solution finale S .

2.2. Dédire des résultats précédents la constante d'acidité K_a et le $\text{p}K_a$ $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}/\text{CH}_3\text{CO}_2^-$

expériences étant choisies par l'enseignant pour favoriser les interrogations et la recherche de réponses par les élèves sous la conduite du professeur. D'autres chercheurs insistent sur la complexité de la tâche ; par exemple, pour équilibrer et interpréter une équation telle que :



ils considèrent que l'étudiant doit avoir compris la structure et l'état physique des réactifs et des produits de la réaction, la nature dynamique des interactions entre particules, les relations quantitatives entre particules et le grand nombre de particules qui interviennent à travers ce symbolisme. Chacune de ces notions nécessitant un apprentissage.