



Croisement d'analyses didactique et épistémologique des thèmes, transformations non totales, état d'équilibre, et critère d'évolution, dans les programmes et les manuels scolaires de Chimie au Baccalauréat Marocain

Ali Ouasri

Laboratoire de Recherche Scientifique et Innovation Pédagogique (LReSIP); Centre Régional des Métiers de l'Education et de la Formation, Madinat Al Irfane, B.P. 3210, Rabat; Maroc

(ORCID: 0000-0002-7145-7759)

This is an open access article under the [CC BY-NC-ND](#) license.



Résumé : Cette étude se veut un croisement d'analyses didactique-épistémologique de l'évolution des systèmes chimiques dans le programme de chimie au Baccalauréat (2006) en termes des trois thèmes: transformations non totales, équilibre chimique, et critère d'évolution spontané. Les transformations non totales sont caractérisées par un avancement final x_f inférieur à l'avancement maximal x_m , soit par un taux d'avancement final inférieur à 1, qui est un critère objectif et rigoureux que ce qui était dans l'ancien programme (1996). L'absence de référence à la modélisation des transformations non totales et l'ambiguïté maintenue sur les termes « réaction dans les deux sens » ou « réactions inverses » indique que la modification du modèle n'a été pas considéré par les concepteurs des programmes et des manuels scolaires comme un enjeu explicite du nouveau programme. L'état d'équilibre y est explicitement présenté comme étant l'état final de l'évolution d'un système chimique, caractérisé par la présence de toutes les espèces et par une valeur du quotient de réaction égale à la constante d'équilibre ($Q_{r,eq} = K$). L'interprétation faite de l'état d'équilibre en termes de cinétique microscopique est explicite dans le programme n'est pas exigible des élèves. L'interprétation cinétique macroscopique basée sur l'égalité des vitesses des réactions inverses ne figure pas dans le programme, qui fournit une démarche basée sur le critère d'évolution pour expliquer et prévoir l'évolution des systèmes en proposant une interprétation dynamique de l'état d'équilibre qui va au-delà d'une simple perception des phénomènes. Pour les choix (modélisation, double regard macroscopique-microscopique), les intentions implicites des auteurs du programme ne sont pas clairement illustrées ni dans les contenus ni dans les programmes et les orientations pédagogiques officiels.

Mots-Clés : Transformation non totale, registre, empirique, modèles, épistémologique, thermodynamique, cinétique, quotient de réaction, constante d'équilibre.

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.11072850>

Didactic and epistemological cross analysis of themes, non-complete transformations, chemistry equilibrium, and evolution criterion, in Chemistry programs and textbooks at the Moroccan Baccalaureate

Abstract: This manuscript aims to develop a cross analysis, didactic and epistemological, of the evolution of chemical system in the chemistry programs at Baccalaureate class in Morocco in terms of three themes: the non-complete transformations, the chemical equilibrium, and the spontaneous evolution criterion. Non-complete transformations are characterized by a final advancement x_f less than the maximal advancement x_m , i.e. by a final advancement rate less than 1, which is an objective and rigorous criterion than what was adopted in the old program (1996). The absence of reference to modeling of non-total transformations, and the ambiguity made on the terms "reaction in both sens" or "reverse reactions" indicates that the modification of the model was not considered by the programs and textbooks designers as an explicit challenge of the novel program. The equilibrium state is explicitly presented as being the final state of the chemical system evolution, characterized by the presence of all species and by a reaction quotient value equal to the equilibrium constant ($Q_{r,eq} = K$). The equilibrium state interpretation made in terms of microscopic kinetics is explicit in the program, but not required of pupils. The macroscopic kinetic interpretation based on the equality of the reverse reactions rates does not appear in the program, which provides an approach based on the evolution criterion to explain and predict the systems evolution, by proposing a dynamic interpretation of the equilibrium state, going beyond a simple perception of phenomena. For the (modeling, double macroscopic-microscopic view) choices, the implicit intentions of the program authors are not clearly illustrated either in the contents or in the programs and official educational orientations.

Keywords: Non-complete transformation, Empiric, register, models, Epistemological, Thermodynamical, Kinetic, Quotient of reaction, Equilibrium constant,

Digital Object Identifier (DOI):

I) Introduction

Lors de l'analyse didactique du savoir à enseigner à propos de l'évolution des systèmes chimiques, nous avons étudié dans quelles mesures les intentions affichées par les auteurs du programme de chimie au Baccalauréat marocain se sont traduites dans ce programme, en termes des contenus, activités, extraits des orientations pédagogiques, et compétences exigibles de l'enseignement de l'évolution des systèmes chimiques (Ouasri, 2022). Dans cette étude, on a identifié dans les orientations pédagogiques officielles les savoirs à enseigner pour les transformations chimiques non totales, l'équilibre chimique, et le critère d'évolution spontané. En se servant du modèle de reconstruction didactique, on a pu analyser la structure du contenu en termes d'élémentarisation du

savoir (Duit, 2000, 2003) et du triangle de Johnstone (1993, 1999) tel que repris par Kermen et Méheut (2009) en quatre niveaux de savoirs en interaction en chimie: deux niveaux pour les modèles macroscopique et microscopique, un niveau empirique, et un niveau symbolique. Cette analyse nous a permis de relever la rigueur apportée par ce programme à la détermination du caractère total ou non total d'une transformation chimique en calculant le taux d'avancement final, et à la détermination du sens d'évolution spontanée d'un système avec le critère d'évolution, thèmes qui ont été identifiés comme objet de compétences exigibles claires (Ouasri, 2022). En effet, les élèves au Baccalauréat sont amenés à découvrir que les réactions chimiques ne parviennent pas nécessairement à l'état d'avancement maximal compatible avec l'état initial du système et que la transformation a lieu dans les deux sens (Ouasri, 2016, 2017).

Dans la perspective de contribuer à la mise en place du programme de chimie au Baccalauréat (2006), relatif à l'évolution des systèmes chimiques, nous avons discuté certains éléments fondamentaux à la conception des séquences d'enseignement dans une analyse épistémologique du contenu/savoir à enseigner (Ouasri, 2023). L'analyse du contenu visait à expliciter les relations entre les modèles d'une part et les phénomènes d'autre part, en se basant sur la modélisation de l'évolution des systèmes chimiques, i.e. la mise en relation du registre empirique avec le monde des modèles, des théories et représentations symboliques permettant de les décrire (Waliser, 1977; Robardet et Guillaud, 1994, 1997; Tiberghien; 1994, Martinand, 1992, 1994, 1995; Sinaceur, 1999).

L'analyse du programme a été donc développée en termes de registre empirique, registre des modèles et registre théorique, en rapport avec trois thèmes (transformations non totales, critère d'évolution et état d'équilibre) que nous avons étudiés selon trois modèles (thermodynamique, cinétique macroscopique et cinétique microscopique), identifiés dans les travaux de Kermen (2007) et de Kermen et Méheut (2008). Lors d'une transformation non totale, toutes les espèces sont présentes à l'équilibre chimique; il n'y a plus de raison simple, issue du registre empirique, pour expliquer l'arrêt de ces transformations. En vue d'apporter des explications à l'arrêt d'une transformation non totale dans l'interprétation faite dans le registre des modèles, nous avons analysé les contenus du registre empirique, du registre modèles, et du registre théorique. L'évolution d'un système chimique a été abordée selon les aspects cinétique et thermodynamique relevant de deux champs théoriques, et donc de deux modèles différents. L'adoption de l'approche thermodynamique consistant à comparer le quotient de réaction du système dans un état donné à la constante d'équilibre permet de prévoir et expliquer le sens d'évolution d'un système chimique. L'approche cinétique permet d'aborder le caractère dynamique des états d'équilibre chimique (Ouasri, 2023).

Après avoir analysé le programme de chimie au Baccalauréat marocain sous l'angle du contrat didactique (Ouasri, 2022) et point de vue épistémologique (modélisation) (Ouasri, 2023), nous essayerons dans cet article de croiser ces deux points de vue en reprenant les trois thèmes (transformations non totales, état d'équilibre chimique, critère d'évolution) étudiés auparavant (Ouasri, 2022, Ouasri, 2023). En effet, nous discuterons comment ces trois thèmes se sont présentés dans le programme de chimie Baccalauréat au niveau des documents officiels (Orientations pédagogiques, Novembre 2006) qu'au niveau des manuels scolaires.

Le Maroc a adopté la pluralité des manuels scolaires au secondaire qualifiant (lycée) dès 2005 pour Tronc commun, et septembre 2007 pour 2^{ème} année Baccalauréat (terminale); ce qui a généré autant de manuels scolaires en chimie (ALWADIH, ALMOFID, etc..) pour divers programmes (MAT-PC; SVT-AGR-STE) du Baccalauréat. Ce qui permet de diversifier les approches pédagogiques et les situations d'enseignement-apprentissage.

Dans la présente étude, et pour des raisons de commodité, de clarté et de précision, nous indiquerons, à chaque fois qu'il y ait besoin de le faire, dans quels programmes ou dans quels manuels scolaires nous discuterons des trois thèmes mis en jeu.

II) Examen des trois thèmes au niveau des Manuels scolaires

Cette partie a pour but de faire part entre les contenus clairement mentionnés et ceux qui sont implicites, entre ce qui figure dans le libellé du programme et ce qui en constitue un prolongement. On cherche donc une cohérence interne au programme de chimie au Baccalauréat, une cohérence avec le programme de Tronc commun (puisque c'est dans cette classe que la réaction chimique est qualifiée de modèle de la transformation chimique) et les changements par rapport au programme du Baccalauréat précédent adopté entre 1996 et 2006.

II.1. Les transformations non totales

Les transformations non totales sont caractérisées par un avancement final x_f inférieur à l'avancement maximal x_m . L'étude de ces transformations serait l'occasion d'introduire le concept de « réaction inverse » dont il est question pour affirmer le caractère dynamique de l'état d'équilibre; ce qui conduit à modifier le modèle adopté depuis la classe de Tronc commun (1^{ère} année du cycle secondaire qualifiant) qui n'impliquait qu'une seule réaction chimique dans le sens de la transformation. Il convient, pour mieux apprécier la nature des changements survenant en classe de Baccalauréat, de rappeler ce que les auteurs du nouveau programme avaient écrit à ce propos.

II.1.1. Rappels du programme de Tronc commun

La distinction entre transformation et réaction chimiques est introduite dans le programme de chimie en Tronc commun, sous forme de recommandations précises. Dans le chapitre 10 « Les transformations chimiques » des manuels scolaires (WAHAT ALPHYSIAA WA ALKIMIAA), on peut dégager des objectifs affichés du programme « Capacité de modéliser une transformation chimique par une réaction chimique ». Dans les orientations pédagogiques relatives à l'enseignement de chimie en Tronc commun (Mars, 2005), la partie « Contenus » du chapitre 10 indique clairement « *la modélisation de la transformation chimique* », alors que dans les compétences exigibles associées ne mentionnent aucune phrase sur le concept de la « réaction chimique » comme étant un modèle de la transformation chimique d'un système, reposant sur une analyse considérant la modélisation comme un travail d'élaboration d'une représentation abstraite simplifiée d'un phénomène.

D'autre part, les orientations pédagogiques (Mars, 2005) relatifs aux « Transformations chimiques » indique « Il fallait insister sur le fait que l'équilibrage d'une équation d'une transformation chimique devrait traduire la conservation des éléments chimiques ainsi que des charges lors de cette transformation ». Par ailleurs, rien dans ces orientations n'indique que « l'enseignement devrait faire bien la distinction entre la transformation subie par le système et la réaction chimique qui modélise cette transformation ». L'une des caractéristiques des modèles « leurs limites » est rappelée pour signaler que la réaction chimique est un modèle macroscopique ne disant rien des processus microscopiques, dont rendent compte les mécanismes réactionnels non abordés au Tronc commun, ni au Baccalauréat. Dans la rubrique « Contenus » des orientations pédagogiques de Tronc commun (Mars 2005, page 48) concernant « La transformation chimique d'un système », le titre du paragraphe (III.2.1) « Modélisation de la transformation » est en accord avec ces considérations.

Les orientations accompagnant ce contenu suggèrent: « une vérification expérimentale de la validité du modèle proposé », comme indiqué dans les activités proposées « Mise en évidence expérimentale de l'influence de la quantité de matière des réactifs sur l'avancement maximal, et la vérification expérimentale de la validité du modèle proposé pour la réaction chimique pour décrire l'évolution du système chimique en transformation: acide éthanóique avec hydrogénocarbonate de sodium ». La réaction chimique apparaît clairement ici comme un modèle dont il importe de vérifier la pertinence par un retour au niveau expérimental.

Nous allons voir ci-après comment la modification de ce modèle est abordée au Baccalauréat lors de l'introduction des transformations non totales.

II.1.2. Modification du modèle dans le programme du Baccalauréat

Dans le programme du Baccalauréat, l'introduction de la notion de réaction inverse nécessaire pour rendre compte des transformations non totales constitue une modification majeure du modèle introduit au Tronc commun. Cette introduction ne fait pas l'objet de recommandation particulière comme le montrent les descriptions développées dans notre étude précédente (Ouasri, 2022). La réaction inverse n'a été pas illustrée comme étant une nouvelle notion dont l'introduction, au niveau du programme au Baccalauréat, vient modifier le modèle proposé dans les classes antérieures, notamment en Tronc commun.

En effet, les termes « modèle », « modélisation » n'ont pas été évoqués pour représenter les transformations chimiques non totales alors qu'une transformation est modélisée par deux réactions inverses; ce qui rend la nécessité de spécifier leur différence de nature et de les distinguer plus grande. A cet égard, l'absence de recommandation sur le statut de modèle des deux réactions inverses tranche avec ce qu'on peut lire dans le programme de Tronc commun.

II.1.3. A propos de la réaction inverse

D'après l'analyse didactique du programme de chimie au Baccalauréat marocain que nous avons réalisée en termes des contenus, des activités et les compétences exigibles associées (Ouasri, 2022), nous constatons que le concept « réaction inverse » fait l'objet de l'utilisation des termes variables dans le programme de chimie au Baccalauréat. Les orientations pédagogiques relatives à la partie 2 de ce programme (Chapitre 3: Transformations chimiques s'effectuant dans les deux sens) mentionnent une réaction chimique s'effectuant dans deux sens, alors dans le cadre de l'interprétation de la réaction chimique de point de vue cinétique (Manuel de chimie de 2^{ème} Bac ALWADIH, page 53), la notion de la réaction directe et inverse est bien mentionnée. C'est le cas de l'estérification-hydrolyse où les deux réactions inverses l'une de l'autre porte chacune un nom consacré par l'usage (Partie 4: Chapitre 9 du programme de Bac). Nous trouvons toujours mentionnées les deux réactions en sens inverses (Manuel de chimie de 2^{ème} Bac ALWADIH, pages 143 et 146).

En effet, les deux expressions « une réaction directe et une réaction inverse » et « une réaction ayant lieu dans les deux sens » ne sont pas équivalentes. Comment peut-on donc concevoir qu'un même processus « la réaction » puisse avoir lieu simultanément dans un sens et dans le sens inverse? Alors que s'il s'agit de deux processus distincts, ce paradoxe disparaît. La simultanéité des deux processus est alors envisageable.

II.1.4. Conclusion provisoire

Dans le programme de chimie au Baccalauréat, tel qu'illustré dans les ouvrages scolaires, les transformations non totales sont caractérisées par un avancement final x_f inférieur à l'avancement maximal x_m , et donc un taux d'avancement final inférieur à un. Cela constitue un critère objectif et plus rigoureux que celui qu'on pouvait rencontrer auparavant ⁽¹⁾.

Par ailleurs, l'absence de telle référence à une modélisation des transformations non totales en rapport avec l'ambiguïté maintenue sur les termes « réaction dans les deux sens » ou « réactions inverses » nous conduit à dire que la modification du modèle n'a été pas considéré de par les concepteurs des programmes et manuels scolaires comme étant un enjeu explicite du programme de chimie au Baccalauréat (Kermen 2007, Ouasri, 2023).

II.2. Etat d'équilibre chimique d'un système

Nous allons rappeler ce qui était dit de l'équilibre chimique dans l'ancien programme au Baccalauréat (1996) avant d'examiner dans le programme (November 2006) la présentation de l'état d'équilibre chimique, terme de l'évolution du système, sous l'angle cinétique et sous l'angle thermodynamique.

II.2.1. L'équilibre chimique dans l'ancien programme

Dans l'ancien programme, l'expression « Etat d'équilibre d'un système chimique » n'a pas été attribuée à un chapitre bien déterminé. On ne trouve pas dans ce programme un chapitre intitulé « Etat d'équilibre d'un système chimique » contrairement à ce qui y est dans le nouveau programme qui accorde un intérêt particulier à l'équilibre chimique. Par ailleurs l'expression « Equilibre chimique », polysémique dans l'ancien programme, y a été introduite et illustrée dans un chapitre intitulé « Notion de couples acide-base », le chapitre 4 de la première partie (Les acides et les bases dans les solutions aqueuses).

A ce propos, on trouve dans le curriculum de l'enseignement des sciences physiques au Baccalauréat (1996) parmi les objectifs/connaissances (parce qu'il y avait encore objectifs / compétences) une phrase: « La réaction entre un acide faible ou une base faible et l'eau est une réaction limitée et inverse, l'acide et la base sont conjugués par rapport au même couple ». En effet, l'expression « Equilibre chimique » n'était pas explicitement utilisée dans le curriculum (1996) que ce soit au niveau des directives et orientations générales, du programme, et des objectifs/connaissances ou objectifs/compétences.

Dans les objectifs/compétences, il a été signalé en relation implicite avec « l'équilibre chimique » l'étude quantitative d'une réaction d'un acide faible ou de base faible avec l'eau. Cette étude comporte, selon le curriculum de chimie Baccalauréat (1996), les points suivants:

- Ecriture d'une réaction bilan.
- Inventaire des espèces chimiques présentes dans la solution.
- Calcul des concentrations de ces espèces à partir de la valeur pH.

⁽¹⁾ Pour les phénomènes acido-basiques, il n'était plus question de la composition du système, seule la valeur de la constante d'équilibre qui était comparée à 10^4 importait et décidait du caractère total ou non de la transformation. Dans le cas d'oxydo-réduction, c'est la comparaison des potentiels d'oxydoréduction standard des couples mises en jeu qui rend compte du caractère de la transformation.

- Calcul de la constante de l'acidité (ou pKa) à partir des concentrations des espèces chimiques présentes dans la solution,
- Calcul du facteur de dissociation,
- Comparaison de la force des acides (ou bases) en tenant compte des constantes d'acidité et inversement.
- Ecriture de l'équation bilan entre un acide et une base.

Dans le seul manuel scolaire de chimie adopté à l'époque pour ce qu'était appelée la troisième secondaire (classes de Bac : Sciences Exp et Sciences Mat, 1996), on trouve au niveau de la première partie du programme, dans le chapitre 4 intitulé « Notions de couples acide-base » un paragraphe qui dit: « Equilibre chimique d'ionisation d'acide éthanóique » et qui a été conclu par la phrase suivante: « La solution d'acide éthanóique ou le mélange d'une solution d'éthanoate de sodium et d'une solution d'acide chlorhydrique montre qu'on est devant un mélange composé des espèces H_3O^+ , CH_3COO^- et CH_3COOH . Ce mélange constitue un équilibre chimique: $\text{CH}_3\text{COOH} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_3\text{O}^+$.

Il semble que, dans l'ancien programme au Baccalauréat, la notion d'équilibre chimique a été liée à la réaction limitée; ce qui désignait la façon dont le système parvient à l'équilibre chimique, alors il était, peut-être, question de processus d'évolution. Il est à signaler ici que le nouveau programme parle de la transformation du système chimique qui n'est pas totale. D'autre part, l'attribution de l'équilibre chimique à un mélange que l'on avait traduit par: $(\text{CH}_3\text{COOH} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_3\text{O}^+)$ semble indiquer, dans l'ancien programme, que l'équilibre chimique résulte de la coexistence des deux réactions opposées. Cela ne concernait plus une évolution entre deux états mais concernait l'état d'équilibre chimique du système dans lequel deux réactions opposées avaient lieu.

Il y'avait donc une contradiction entre les deux explications puisque l'équilibre chimique était d'une part une réaction limitée, et d'autre part résultait de deux réactions opposées. Toute fois, c'est pour le chapitre 3 « Les acides carboxyliques » de la troisième partie « Chimie organique » du programme qu'on trouve clairement dans les objectifs/connaissances relevant du curriculum une phrase concernant l'équilibre chimique de l'estérification et l'hydrolyse: « L'équilibre chimique de l'estérification et l'hydrolyse résulte de deux réactions à la fois ». Il en va tout autrement dans le nouveau programme de chimie au Baccalauréat.

II.2.2. Approche cinétique de l'état d'équilibre chimique d'un système

Dans l'approche cinétique, l'état d'équilibre d'un système s'explique d'un point de vue macroscopique en considérant que la vitesse de la réaction directe est égale à la vitesse de la réaction inverse, et d'un point de vue microscopique en considérant que les fréquences des chocs efficaces sont telles que les populations de chaque type de particules sont constantes. Le savoir en cinétique comporte donc deux aspects, macroscopique et microscopique. Ainsi, les contenus, les activités, les indications, et les orientations pédagogiques accompagnant les programmes (documents officiels) font-ils une distinction claire entre ces deux aspects?

Dès l'introduction du document « Orientations pédagogiques de chimie, 2^{ème} Baccalauréat, Novembre 2006 », l'intérêt de l'interprétation microscopique de l'état d'équilibre est affirmé: « Le retour vers le niveau microscopique permet d'interpréter l'état final comme état d'équilibre du système et non comme état statique... ». Cela est affiché dans l'introduction de la deuxième partie du programme « Transformations non totales d'un système chimique ».

Cet intérêt s'est décliné dans les orientations du programme (PC-MAT) à la fin de la partie de cinétique (Chapitre 2 / Partie 1 du programme) où une première approche qualitative de l'état d'équilibre chimique est annoncée: « La réaction chimique se produit à l'occasion d'un choc efficace entre espèces réactives ou produites »; ce qui explique qualitativement l'effet de la concentration des espèces (sur le nombre de chocs par unité de temps) ainsi que l'effet de la température sur d'une part le nombre de chocs par unité de temps et sur l'efficacité de ces chocs d'autre part. On trouve à la fin des orientations de cette partie de cinétique une phrase: « Il est possible de mettre en évidence les notions de réaction directe et inverse, et de même pour la notion d'équilibre, par l'assimilation des phénomènes ».

On peut donc remarquer que dans la première phrase « la réaction chimique... », la réaction chimique apparaît comme un processus microscopique ayant lieu en une seule étape puisque résultant d'un choc efficace entre entités. Cependant, dans la deuxième phrase « Il est possible... », le contexte ne permet pas de parler de la nature de la réaction directe et de celle de la réaction inverse, microscopique ou pas, en une seule étape ou pas. A cet égard, il faut rappeler que dans le programme, la réaction chimique est un concept macroscopique et que la notion de réaction élémentaire, relative à un processus en une seule étape, ne figure pas.

Dans l'introduction de la deuxième partie du programme « Transformations non totales d'un système chimique » est affirmée encore la possibilité d'interpréter l'état d'équilibre à l'échelle microscopique « Un retour sur le niveau microscopique permet d'interpréter l'état final du système comme un état d'équilibre dynamique et non comme un état figé, comme la simple observation pourrait le suggérer ». Cela est repris dans le contenu du chapitre 3 « Transformations chimiques s'effectuant dans les deux sens » (Partie 2 du programme) par la phrase: « Interprétation à l'échelle microscopique de l'état d'équilibre en considérant les chocs efficaces entre espèces réactives d'une part et espèces produites d'autre part », avec une activité proposée « Modélisation d'un état d'équilibre à l'échelle microscopique », et sans aucune compétence exigible associée. Il est donc explicitement annoncé que la notion de chocs efficaces caractérise l'échelle microscopique sans que cela ne soit exigible des élèves.

Cependant l'interprétation cinétique macroscopique basée sur l'égalité des vitesses des réactions inverses n'est pas mentionnée dans les documents officiels « programmes et orientations pédagogiques, November 2006 ». La seule phrase qu'on trouve dans le manuel scolaire de chimie au Baccalauréat (ALWADIH) où il est fait mention de la vitesse dans le cadre de l'interprétation de l'état d'équilibre relatif à l'estérification-hydrolyse se trouve dans la quatrième partie du programme (Chapitre 9), à la page 143 de ce manuel « L'estérification et l'hydrolyse sont deux réactions inverses, non totales et instantanées. Lorsque ses deux vitesses sont égales, l'état d'équilibre, où il y a coexistence des réactifs et produits, est établi »

Pour les compétences exigibles accompagnant le chapitre 4 « Etat d'équilibre d'un système chimique » (Partie 2 du programme), il a été signalé que les élèves devaient savoir que « les quantités de matière n'évolueraient pas à l'état d'équilibre et que cet état est dynamique ». Or, il n'y a pas de compétences exigibles à ce sujet dans le chapitre 3; il n'est pas question de vitesse dans les orientations pédagogiques. On peut donc se demander s'il est prévu que les élèves affirment simplement ce « caractère dynamique » ou qu'ils fassent référence aux chocs efficaces entre entités ou encore à l'égalité des vitesses des réactions inverses?

Ainsi, il semble que l'interprétation de l'état d'équilibre à l'échelle microscopique est privilégiée dans les contenus du programme de chimie au Bac., et que l'interprétation macroscopique en termes de vitesses des réactions inverses y est omise.

II.2.3. A propos de modélisation

On constate que le terme « Modélisation » n'est utilisé qu'à deux reprises dans le programme de chimie Baccalauréat (contenus, activités, compétences exigibles et orientations): l'un implicitement lors de l'interprétation microscopique du rôle de la température et des concentrations sur la vitesse d'une transformation (voir contenu et activités du chapitre 2 intitulé suivi temporel d'une transformation chimique - vitesse de réaction / partie 1 du programme), l'autre pour parler de « la modélisation d'un état d'équilibre dynamique à l'échelle microscopique ». Cela est utilisé dans le but d'interpréter à l'échelle microscopique d'un état d'équilibre en considérant les chocs efficaces entre les entités réactives d'une part et les entités produites d'autre part (Chapitre 3: Transformations chimiques s'effectuant dans les deux sens/Partie 2).

II.2.4. Approche thermodynamique de l'état d'équilibre chimique d'un système

Dans l'approche thermodynamique, le système est en état d'équilibre lorsque son quotient de réaction est égal à la constante d'équilibre, et toutes les espèces étant présentes en quantités constantes au cours du temps. Dans le chapitre 4 consacré à l'état d'équilibre d'un système chimique (Partie 2 du programme 2006), le quotient de réaction associé à l'équation chimique est défini a priori, puis généralisé aux différents cas : solutions homogènes et hétérogènes où existent des entités solides. C'est à partir des mesures par la conductimétrie qu'il serait mis en évidence que le quotient de réaction Q_r d'un système ait la même valeur $Q_{r,eq}$ (valeur égale à la constante d'équilibre K) dans différents états d'équilibre à une température donnée.

Selon les orientations pédagogiques (2006), le quotient de réaction est défini, pour un système homogène en solution aqueuse, en associant aux solutés un nombre sans dimension qui est le rapport de la concentration du soluté à celle de référence (activité du soluté en solution infiniment diluée sans que cela soit annoncé comme tel). Pour les solides et le solvant (qui intervient dans les équations acido-basiques), il est évoqué de façon à ce que seules les concentrations des espèces dissoutes interviennent dans l'expression du quotient de réaction.

II.2.5. Conclusion provisoire

L'état d'équilibre d'un système chimique est explicitement présenté comme étant l'état final résultant de l'évolution de ce système. Cet état est caractérisé par la présence de toutes les espèces et la valeur du quotient de réaction, égale à la constante d'équilibre ($Q_{r,eq} = K$). Il s'est avéré que l'interprétation faite de l'état d'équilibre en termes de cinétique microscopique est explicite dans le programme (2006) de chimie au Baccalauréat, mais n'est pas exigible des élèves. Cependant l'interprétation en termes de cinétique macroscopique, basée sur l'égalité des vitesses des réactions inverses, ne figure pas dans ce programme.

II.3. Le critère d'évolution

L'évolution des systèmes est explicitement décrite dans le programme de chimie (2006) au Baccalauréat; il s'agit d'introduire un critère permettant de la prévoir. On trouve dans le préambule du Partie 3 de ce programme « Sens d'évolution d'un système chimique », qui introduit le critère d'évolution spontanée, une phrase « Tout système chimique évolue spontanément vers un état d'équilibre » (Programmes et orientations pédagogiques, 2006, p. 40 pour SVT-AGR-STE et p. 51 pour MAT-PC) pour ensuite développer les divers cas résultant de la comparaison du quotient de réaction à la constante d'équilibre. Il est à noter que l'exemple des systèmes

hétérogènes dont on peut rencontrer des situations où le système ne peut parvenir à l'équilibre, faute du solide en quantité suffisante, n'est pas abordé.

Le programme est explicite; on ne peut donc parler du sens d'une transformation que lorsque le système étudié est précisé, et sa composition dans l'état considéré soit connue. Le calcul du quotient de réaction du système dans cet état est effectué en référence à l'équation chimique. La comparaison du quotient calculé Q_r à la constante d'équilibre K associée à l'équation permet de déterminer le sens de la transformation du système: il devrait se former des réactifs ou des produits; le système serait donc évolué en sens inverse ou en sens direct.

On note une évolution par rapport à ce qui était adopté dans le programme (1996) dont on ne trouve pas clairement indiqué le critère d'évolution ni dans les directives et les orientations générales, ni dans les objectifs (connaissances et compétences). Néanmoins tout ce qui y a été affiché en lien avec le sens d'évolution c'est: « Définition de la constante K_A , applications: classifications des couples acide/base », une partie de ce programme qui a été illustrée au niveau du manuel scolaire de chimie de troisième secondaire (1996), notamment dans le chapitre 5 « Forces des acides et des bases » de la première partie du programme.

Dans ce chapitre, il a été indiqué (Manuel scolaire, p. 53) qu'une réaction acide-base conduit à un équilibre chimique dont l'équation bilan est : $A_1H + A_2^-(aq) \rightleftharpoons A_1^-(aq) + A_2H$, la constante d'équilibre est : $K_C = K_{A1}/K_{A2}$, le déplacement de l'équilibre chimique dans un sens ou dans l'autre se fait par la comparaison des constantes d'acidité K_{A1} et K_{A2} de deux couples A_1H/A_1^- et A_2H/A_2^- et en déterminant K_C . Si par exemple $K_{A1} > K_{A2}$ donc $K_C > 1$, l'équilibre chimique se déplace dans le sens 1, celui de la réaction de A_1H avec A_2^- , i.e. le sens de la réaction entre l'acide le plus fort A_1H avec la base la plus forte A_2^- .

Cependant dans les orientations pédagogiques (Novembre, 2006), on peut lire au début des orientations relatives à la troisième partie consacrée au critère d'évolution la phrase suivante : « La constante d'équilibre K ne permet pas de prévoir le sens d'évolution du système » (p. 51 pour SVT-AGR-STE ; p. 63 pour MAT-PC) ; cela peut être conçu comme étant une critique de ce qui était précédemment dans le programme de 1996, dans lequel rien n'a été indiqué sur le lien entre la constante d'équilibre K_C et le fait que la réaction de dosage est quantitative». Cependant, Cela est illustré dans le programme (2006) par la phrase « Détermination du taux d'avancement final d'une réaction sur un exemple de titrage acido-basique » affichée dans le contenu relatif au chapitre 5 « Transformations associées à des réactions acido-basiques en solution aqueuses » (Partie 2 du programme 2006).

Il s'est avéré que l'ancienne façon de concevoir les choses n'a pas pu définir un système, ni connaître sa composition pour dire si le dosage correspond à une transformation totale tandis que, désormais, la composition du système est prise en compte; il s'agit de comparer l'avancement final obtenu à ce qu'il serait si la transformation était totale en calculant le taux d'avancement final.

II.4. Conclusion provisoire

Le programme de chimie au Baccalauréat (2006), à l'instar du programme 2002 en France, fournit une démarche basée sur le critère d'évolution, valable dans la plupart des cas; cette démarche permet d'expliquer et de prévoir une évolution ou une absence d'évolution pour la plupart des systèmes. Ce programme fournit aussi un critère objectif, le taux d'avancement, qui permet de décider du caractère total ou non d'une transformation; il propose enfin une interprétation dynamique de l'état d'équilibre qui dépasse la perception des phénomènes. Les intentions implicites des auteurs du programme pour certains choix (modélisation, double regard macroscopique-

microscopique) ne sont illustrés de façon claire ni dans le libellé des contenus ni dans les orientations accompagnant ce programme.

III) Examen des trois thèmes dans les orientations pédagogiques, documents officiels

La consultation des orientations pédagogiques (2006), documents officiels considérés comme ayant un caractère réglementaire, permet de lever certaines imprécisions. L'examen des contenus, des activités et des compétences exigibles dans ces documents est effectué pour répondre à certaines interrogations discutées auparavant, que l'on pose sous formes de questions suivantes:

- Est-il question de « la réaction dans les deux sens » ou de deux réactions inverses l'une de l'autre?
- Est-il annoncé que l'introduction de la notion de réaction inverse constitue une modification du modèle utilisé jusque-là?
- Est-il question de l'égalité des vitesses des réactions inverses dans l'état d'équilibre chimique?
- Est-il apporté certaines précisions à l'utilisation du critère d'évolution dans le cas des systèmes hétérogènes?

III.1. Les réactions inverses

Dans les orientations pédagogiques est-il question de « la réaction dans les deux sens » ou de deux réactions inverses l'une de l'autre?

Dans l'introduction générale des orientations pédagogiques de chimie au Baccalauréat (2006) (p.39-40 pour SVT-AGR-STE ; 50-51 pour MAT-PC), il a été écrit dans la partie 2 de ces documents « Transformations non totales d'un système chimique », que « cette partie a pour objectif de pousser les élèves à découvrir que la réaction chimique n'est pas toujours totale... » et que « cette nouvelle situation permet à l'élève de changer l'écriture de l'équation chimique qui devrait traduire le fait que la réaction se produise en deux sens inverses. Le retour à l'échelle microscopique permet d'expliquer l'état final comme un état d'équilibre dynamique du système, et non un état figé que pourraient le montrer des observations simples.

Cependant si on examine le contenu de ces orientations pédagogiques (p. 41 et 48 pour SVT-AGR-STE; p. 52 pour MAT-PC), on trouve dans le chapitre 3 (Partie 2) une phrase qui semble apporter une contradiction « Modélisation d'une transformation chimique non totale par deux réactions inverses instantanées par l'écriture $aA + bB \rightleftharpoons cC + dD$ » avec ce qui a été dit précédemment « une seule réaction s'effectuant en deux sens ». Ensuite dans l'activité proposée dans le chapitre 3/Partie 2 (p. 48 pour SVT-AGR-STE; p.60 pour MAT-PC), on trouve « Mise en évidence, par la mesure de pH-mètre, que la transformation chimique n'est pas toujours totale et que la réaction correspondante se produit dans les deux sens... ».

La notion de réaction inverse est introduite, et l'objectif affiché est de montrer qu'il existe une réaction en sens inverse. Dans le descriptif de l'activité, la question est posée sur l'existence de cette réaction inverse dans le cas d'une transformation acido-basique (Manuel ALWADIH FI ALKIMIA, p. 46); une expérience permettant de conclure à la validité de cette proposition y est décrite, et la conclusion est ainsi énoncée « Cette réaction est la réaction inverse de celle intervenant dans la première expérience » (ALWADIH FI ALKIMIA, p. 52). L'interprétation dynamique qui en suit est explicite: « On a vu précédemment qu'il existe deux réactions inverses, l'une de l'autre, et instantanées » et comporte l'écriture des équations de chacune des réactions inverses, avec le symbolisme d'une seule flèche, tant que le signe double flèches \rightleftharpoons ne serait introduit qu'en conclusion de cette interprétation.

III.2. Modification du modèle de la transformation chimique

Est-il dit dans les orientations pédagogiques que l'introduction de la notion de réaction inverse constitue une modification du modèle utilisé jusque-là?

Les contenus, les activités et les orientations qui figurent dans les documents officiels font, d'une manière ou d'une autre, référence à une modification du modèle adopté et utilisé en Tronc commun jusque-là pour représenter les transformations chimiques totales.

Dans l'introduction du programme de chimie dans les documents officiels, notamment la partie 2 « Transformations non totales d'un système chimique », (p. 39 pour SVT-AGR-STE; p. 50 pour MAT-PC), on trouve les phrases: « Cette partie a pour objectif de pousser les élèves à découvrir que la réaction chimique n'est pas toujours totale » et « Cette situation permet à l'élève de changer l'écriture de l'équation chimique afin de traduire le fait que la réaction se produise en deux sens ».

L'activité proposée dans le chapitre 3 « Transformations s'effectuant dans les deux sens » (p. 48: SVT-AGR-STE; p. 60: MAT-PC) propose « La mise en évidence, par la mesure de pH, que la transformation ne soit pas toujours totale et que la réaction correspondante se produise dans les deux sens: exemples du domaine acido-basique », ce qui constitue donc une démarche expérimentale de la notion de « la réaction inverse ».

On peut dire que dans cette activité, il s'agit de distinguer « trois niveaux de présentation, le niveau phénoménologique (celui de la transformation observée), le niveau de modélisation (la réaction chimique associée à la transformation) et le niveau de symbolisation (l'écriture de l'équation de réaction) ». A cette modification du modèle correspond un changement dans l'écriture symbolique puisque le symbole flèche, utilisé en Tronc commun et en 1^{ère} année Bac, dans l'équation chimique est remplacé en terminale par le signe \rightleftharpoons ; ce qui a été d'ailleurs justifié en termes de certaines intentions explicites dans les orientations pédagogiques:

- Au niveau des contenus (p. 48: SVT-AGR-STE; p. 60: MAT-PC), on trouve une phrase: « Modélisation d'une transformation chimique non totale par deux réactions inverses instantanées, et par l'écriture symbolique en utilisant le signe \rightleftharpoons ».

- Au niveau des orientations (p. 50 pour SVT-AGR-STE; p. 61 pour MAT-PC), on trouve la phrase: « Des expériences complémentaires, par la mesure de pH, lors de l'ajout d'éthanoate de sodium solide (pour ne pas modifier le volume) montrent que la réaction chimique, ayant lieu, s'effectue dans les deux sens; ce qui justifie l'utilisation des deux flèches ».

Cette « écriture conventionnelle avec deux flèches » a pour but de rappeler la conservation des atomes et des charges sans pour autant préjuger du sens spontané de la transformation.

III.3. Modèle macroscopique de l'état d'équilibre chimique

Que disent-ils les orientations pédagogiques à propos de l'égalité des vitesses des réactions inverses dans l'état d'équilibre chimique?

On constate qu'il est fait appel, dans le manuel (ALWADIH FI ALKIMIA, p. 53 et 143) à l'égalité des vitesses des réactions inverses lors de l'équilibre chimique; ce qui n'était pas mentionné dans l'introduction, les contenus, les activités et les compétences exigibles figurant dans les orientations pédagogiques (2006). Cela apparaît, même si n'est pas bien explicité, comme une interprétation distincte de l'interprétation microscopique qui est bien explicitée et clairement mentionnée dans les orientations pédagogiques.

Dans le chapitre 3 « Transformations chimiques s'effectuant dans les deux sens » de la partie 2 du programme Baccalauréat, notamment lors du paragraphe « L'interprétation dynamique de l'équilibre » (Manuel ALWADIH FI ALKIMIA, p.53), les auteurs de ce manuel écrivent: « Lors de l'évolution d'un système la vitesse v_1 relative à la réaction directe décroît en raison de la disparition des réactifs de la réaction (1), alors que v_2 croît jusqu'à ce que la relation $v_1 = v_2$ soit établie. A ce moment les concentrations des réactifs et produits deviennent constantes. On dit que le système chimique est à l'état d'équilibre dynamique. Dans ce paragraphe, les auteurs écrivent: « Il faut distinguer entre la transformation et la réaction; alors que la transformation est l'évolution du système chimique comme l'on observe à l'échelle macroscopique, la réaction présente une modélisation des interactions se produisant entre les espèces chimiques à l'échelle microscopique ».

Au niveau du chapitre 9 intitulé « Réactions d'estérification et hydrolyse » (partie 4 du programme), et pour interpréter l'état d'équilibre Estérification-hydrolyse, il a été écrit dans le manuel ALWADIH FI ALKIMIA (p.143): « L'estérification et hydrolyse sont deux réactions inverses, simultanées et non totales. Lorsque ses deux vitesses sont égales, on obtient l'état d'équilibre qui est caractérisé par la coexistence des réactifs et produits... ».

Ce qu'on peut donc retenir, c'est que l'on parle de l'équilibre dynamique qui est toujours le siège des deux réactions inverses, l'une de l'autre, simultanées et s'effectuant à des vitesses égales. Il est à noter que l'interprétation microscopique faite de l'équilibre en est alors bien distincte de l'explication en termes de vitesses; cependant les deux interprétations n'ont pas le même statut. L'interprétation microscopique se fait dans le cadre d'un modèle, ce qui n'est pas dit pour l'interprétation macroscopique en termes de vitesses, que cela soit dans le manuel scolaire ou dans les orientations pédagogiques officiels (2006).

III.4. Utilisation du critère d'évolution en cas des systèmes hétérogènes

Les programmes et les orientations pédagogiques apportent-ils quelques précisions à l'utilisation du critère d'évolution dans le cas des systèmes hétérogènes?

L'examen des orientations pédagogiques montre qu'ils contiennent deux activités:

- « Mise en évidence du critère d'évolution spontanée d'un système chimique à partir de quelques expériences: mélange d'acide éthanoïque, d'éthanoate de sodium, d'acide méthanoïque et de méthanoates de sodium » (p. 51: SVT-AGR-STE; p. 62: MAT-PC).
- « Exemples de transformations prises du domaine d'oxydo-réduction: mélange hétérogène contenant deux solutions des ions Fe^{2+} et Fe^{3+} ainsi que les métaux Fe et Cu à l'état solide, en poudre » (p. 51: SVT-AGR-STE; p. 62: MAT-PC).

Dans la première activité, la seule situation proposée comporte initialement toutes les espèces, réactifs et produits, dans le cas des transformations acido-basiques. Il y a une autre activité « Application du critère de l'évolution spontanée sur une réaction oxydo-réduction » dans le manuel scolaire (ALWADIH FI ALKIMIA, p.98) qui n'est pas mentionnée dans les orientations pédagogiques. Cette activité comporte, initialement, toutes les espèces dans le cas de transformations d'oxydo-réduction, et propose de mélanger quatre solutions: S₁ Diode (I₂), S₂ Iodure de Potassium (d'où viennent les ions I⁻), S₃ Sulfate de Fer (II) (d'où viennent les ions Fe^{2+}) et S₄ Sulfate de Fer (III) (d'où viennent les ions Fe^{3+}).

L'analyse des orientations pédagogiques nous permet de retenir qu'il aurait été voulu de préciser explicitement que le critère d'évolution s'applique à toutes les transformations, que ce soit en présence de toutes les espèces

chimiques (réactifs et produits) ou en présence des réactifs seuls. Ce dernier cas fait l'objet de la deuxième activité trouvée dans les orientations pédagogiques (Intention clairement affichée), mais elle n'est pas traitée par aucun exemple dans le manuel scolaire, chapitre 6 « l'évolution spontanée d'un système chimique ».

La deuxième activité proposée dans les orientations pédagogiques étudie un mélange hétérogène contenant deux métaux (Fe et Cu) et deux solutions aqueuses du métal de Fer (Fe^{2+} et Fe^{3+}). Même si cette activité n'est pas illustrée dans le manuel scolaire, ce qui est une remarque didactique importante, on pourrait s'attendre à une transformation pouvant être totale ($\text{Cu} + \text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + \text{Fe}$) qui donnerait lieu à un mélange constitué par le métal Fe et les cations Cu^{2+} et Fe^{3+} , qui ne seraient pas entrés en réaction dans cette transformation. Si cette activité avait été traitée dans le manuel scolaire, elle aurait pu illustrer le cas où seuls les réactifs sont initialement intervenus lors de la transformation d'un système chimique.

Par ailleurs, les auteurs du manuel scolaire ont présenté un exemple d'activité sur un mélange hétérogène (Zn^{2+} , Zn_s , Cu^{2+} , Cu_s) lors de l'introduction du chapitre 7 (Partie 3 du programme) « Transformations spontanées dans les piles et récupération d'énergie ». Cette activité présentée sous le thème « Transition spontanée et directe des électrons » (Manuel ALWADIH FI ALKIMIA, p.107) traite toujours le cas où toutes les espèces (réactifs et produits) sont initialement présentes.

Toutefois, ce mélange hétérogène de deux métaux Cu et Zn et deux solutions aqueuses (sulfate de Zinc et sulfate de cuivre) donnerait lieu à une transformation totale ($\text{Zn} + \text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + \text{Cu}$); ce qui fait que les produits de cette transformation (Zn^{2+} et Cu) ne donneraient lieu à aucune modification visible. Cette absence de modification s'explique par le fait l'avancement à l'équilibre est « très petit voisin de zéro », c'est-à-dire « Il suffit de très peu d'ions cuivre (II) formés, en sens inverse, pour que le système atteigne son état d'équilibre » (Kermen., 2007). Ce dernier exemple constitue une limite d'application du critère d'évolution dans la mesure où la valeur calculée de l'avancement à l'équilibre, 2.10^{-39} mol, n'a aucune signification physique « valeur de la constante d'Avogadro $6,02.10^{23}$ entités par mole » (Kermen, 2007).

En tous cas, on remarque que ces auteurs n'ont pas signalé que dans le cas des systèmes hétérogènes, que l'état d'équilibre n'est pas toujours atteint. Alors, même si les orientations pédagogiques proposent une activité sur les systèmes hétérogènes pour mettre en évidence le critère d'évolution spontanée d'un tel système (p. 51: SVT-AGR-STE; p. 62: MAT-PC), les auteurs du manuel scolaire n'avaient pas illustré ce cas; ce qui traduit leurs intentions à ne pas développer avec les élèves au Baccalauréat le cas des systèmes hétérogènes.

On peut s'étonner quand on voit que les exemples donnés renvoient au programme de première année Baccalauréat, et qu'ils ne soient faits allusion à certaines situations étudiées dans le programme de Baccalauréat. En effet les exemples traités dans les activités proposés, que ce soit dans les orientations pédagogiques ou dans les manuels scolaires, concerne un système hétérogène qui peut ne pas conduire à un état d'équilibre si la quantité initiale de métal (réactif) est insuffisante par rapport à la quantité initiale du cation métallique (réactif). Les enseignants devraient-ils considérer que de telles situations sont, ou ne sont pas, à traiter avec les élèves?

III.5. Récapitulatif

Dans le tableau 1, nous récapitulons les diverses rubriques qu'affichent les orientations pédagogiques de chimie au Baccalauréat (SVT-AGR-STE et MAT-PC; 2006), dites documents d'accompagnement, où certaines notions des contenus sont mentionnées. Ce tableau montre où ces notions figurent dans les documents officiels pour SVT-

AGR-STE et MAT-PC, en suivant l'ordre de leur apparition dans l'une ou l'autre des quatre rubriques des orientations pédagogiques.

Tableau 1: Récapitulatif des notions citées dans les diverses rubriques des programmes. On désigne par **P.I:** Partie 1 du programme; **P.I-2:** chapitre 2, partie 1 du programme, etc...

Notions	Rubriques des programmes				Documents d'accompagnement
	Contenus	Activités	Compétences exigibles	Commentaires	
Chocs efficaces	P.I-2 P.II-3			P. I	p. 58: MAT-PC p. 59: MAT-PC p. 60: MAT-PC
Réactions inverses	P.II-3		P.IV-9		p. 48: SVT-AGR-STE et p. 60: MAT-PC p. 52-53: SVT-AGR-STE et p. 65: MAT-PC
Réaction s'effectuant dans les deux sens		P.II-3		P. II	p. 48: SVT-AGR-STE et p. 60: MAT-PC p. 50: SVT-AGR-STE et p. 61: MAT-PC
Etat d'équilibre	P.II-4 P.IV-9	P.II-4 P.IV-9	P.II-4 P.IV-9	P. IV	p. 48: SVT-AGR-STE et p. 60: MAT-PC p. 52-53: SVT-AGR-STE et p. 65: MAT-PC p. 54: SVT-AGR-STE et p. 66: MAT-PC
Transformation non totale $X_f < X_{max}$	P.II-3	P.II-3		P. II	p. 48: SVT-AGR-STE et p. 60: MAT-PC p. 49: SVT-AGR-STE et p. 61: MAT-PC
Equilibre dynamique		P.II-3			p. 48: SVT-AGR-STE et p. 60: MAT-PC
Taux d'avancement final X_f	P.II-3	P.II-4	P.II-3	P. II	p. 48: SVT-AGR-STE et p. 60: MAT-PC p. 50: SVT-AGR-STE et p. 61: MAT-PC
Quotient de réaction Q_r	P.II-4 P.III-6	P.II-4	P.II-4 P.III-6	P.II P.III P. IV	p. 48: SVT-AGR-STE et p. 60: MAT-PC p. 50: SVT-AGR-STE et p. 61: MAT-PC p. 51: SVT-AGR-STE et p. 62: MAT-PC p. 52: SVT-AGR-STE et p. 63: MAT-PC p. 53: SVT-AGR-STE et p. 65: MAT-PC
Constante d'équilibre K	P.II-4 P.III-6		P.II-4 P.III-6	P.II P. IV	p. 48: SVT-AGR-STE et p. 60: MAT-PC p. 50: SVT-AGR-STE et p. 61: MAT-PC p. 51: SVT-AGR-STE et p. 62: MAT-PC p. 53: SVT-AGR-STE et p. 65: MAT-PC
Critère d'évolution	P.II-6	P.II-6		P.III	p. 51: SVT-AGR-STE et p. 62: MAT-PC
Egalité vitesses des réactions inverses	---	---	---	---	---

La dernière colonne du tableau 1 montre que toutes les notions examinées figurent dans les documents officiels, à l'exception de la notion « Egalité vitesses des réactions inverses » qui n'a pas été introduite comme « Intention didactique » dans les contenus, les activités et les compétences exigibles; ce qui est d'ailleurs bien illustré dans la dernière ligne du tableau. Néanmoins, cette notion figurée quelque part dans le manuel scolaire, comme l'a montré la discussion précédente, ne fait partie des intentions affichées par les auteurs des programmes.

Le tableau 1 montre dans quelles parties des programmes et dans quelle(s) rubrique(s) une telle notion a été citée. La notion « égalité des vitesses des réactions inverses » n'apparaît pas dans les orientations pédagogiques, conformément à la discussion précédente. La notion « réaction inverse » n'apparaît que deux fois dans les documents officiels, dans le contenu du chapitre 3 (Partie 2 du programme). Cela renvoie à la discussion précédente à propos de l'expression « la réaction s'effectuant dans les deux sens », adoptée dans les activités du chapitre 3 (Partie 2 du programme) au lieu de « réactions inverses ».

Il est donc à rappeler que ces deux notions n'ont pas la même signification; d'où l'ambiguïté qui semble régir chez les auteurs des programmes à propos de ces notions. La notion « Equilibre dynamique » n'apparaît qu'une seule fois dans les orientations pédagogiques, notamment dans les activités relatives au chapitre 3 (Partie 2 du programme) sans qu'elle ait fait l'objet d'aucune illustration dans le contenu de ce chapitre; ce qui est vraiment paradoxal.

La colonne « Compétences exigibles » montre cinq cases vides correspondant aux à cinq notions: « Chocs efficaces », « Transformations non totales », « Equilibre dynamique », « Critère d'évolution » et « Egalité des vitesses des réactions inverses ».

La discussion a d'ailleurs montré que la notion « Egalité des vitesses des réactions inverses » a été signalée dans le manuel scolaire même si celle-ci n'a pas été citée dans les contenus, les activités proposées, les compétences exigibles et ainsi dans les commentaires relevant des orientations pédagogiques, documents officiels.

IV) Conclusion

L'examen des orientations pédagogiques, documents officiels parus en Novembre 2006 ainsi que le manuel scolaire de chimie au Baccalauréat (ALWADIH FI ALKIMIA) nous a permis de dégager certaines conclusions importantes:

- Les transformations non totales sont caractérisées par un avancement final x_f inférieur à l'avancement maximal x_m et donc par un taux d'avancement final inférieur à un. Ce qui constitue un critère objectif et rigoureux que celui utilisé dans l'ancien programme (1996).

- L'absence d'aucune référence à une modélisation des transformations non totales en rapport avec l'ambiguïté maintenue sur les termes « Réaction dans les deux sens » ou « Réactions inverses » indique que la modification du modèle n'est pas un enjeu explicite du nouveau programme. Une transformation non totale est représentée par deux réactions inverses ayant lieu simultanément et dont les vitesses deviennent égales lorsque le système atteint son état d'équilibre.

- L'interprétation microscopique de l'état d'équilibre en termes de chocs efficaces aurait dû être distinguée de l'interprétation en termes d'égalité des vitesses qui n'est pas mentionnée dans toutes les rubriques relevant des orientations pédagogiques (Tableau 1). Cependant cette notion d'égalité de vitesse est discutée quelques parts dans le manuel scolaire sans qu'elle ait fait clairement l'objet d'intentions des auteurs des programmes.

- L'état d'équilibre d'un système chimique, explicitement présenté comme étant l'état final résultant de l'évolution du système, est caractérisé par la présence de toutes les espèces et par une valeur du quotient de réaction égale à la constante d'équilibre. L'interprétation faite de l'état d'équilibre en termes de cinétique microscopique est donc explicite dans le programme de chimie au Baccalauréat, mais n'est pas considéré comme compétence exigible des élèves. Cependant l'interprétation en termes de cinétique macroscopique, basée sur l'égalité des vitesses des réactions inverses, ne figure pas dans les orientations pédagogiques (2006).

- La démarche basée sur le critère d'évolution, dans les orientations pédagogiques, est valable dans la plupart des cas, elle permet d'expliquer et de prévoir une évolution ou non pour la plupart des systèmes. Aussi un critère objectif, le taux d'avancement, permet de décider du caractère total ou non d'une transformation, en proposant une interprétation dynamique de l'état d'équilibre pour aller au-delà de la perception des phénomènes.

- Les intentions affichées implicitement par les auteurs des programmes pour certains choix (modélisation, double regard macroscopique-microscopique) ne se sont illustrés de façon claire ni dans les contenus ni dans les orientations des documents officiels. Celles-ci n'évoquent pas clairement les deux limites d'application du critère d'évolution: avancement très faible et état d'équilibre non atteignable. Cela aurait été introduit dans la rubrique compétences exigibles associées à l'activité sur les mélanges hétérogènes qui a été proposée dans les orientations pédagogiques; chose qui d'ailleurs n'y est pas mentionnée.

- Il subsiste une indétermination quant au rôle des modèles : alors qu'il y a une modification profonde du modèle utilisé pour représenter les transformations chimiques jusque la première année Bac totales, et qu'il paraît nécessaire de spécifier en quoi cette modification consiste, rien n'en est explicité dans les orientations pédagogiques qui n'ont pas explicitement signalé que des modèles différents permettent d'interpréter l'état d'équilibre chimique, ni quand l'occasion se présente qu'un modèle connaît des limites d'application.

En termes de comparaison, le programme de chimie au Baccalauréat (2006) semble être complètement inspiré du programme adopté en 2002 en France, en suivant une démarche valable pour la plupart des systèmes chimiques, basée sur le critère d'évolution, le taux d'avancement, et une interprétation dynamique de l'état d'équilibre. C'est pourquoi nous avons étudié ce programme de point de vue didactique (Ouasri, 2022), épistémologique (Ouasri, 2023), avant de développer le croisement des deux analyses précédentes en lien avec les manuels scolaires dans les quels il a été transposé dans le contexte marocain; ce qui nous permet de soulever et discuter les intentions des concepteurs des manuels scolaires, à propos de ce programme inspiré du contexte français.

REFERENCES

- [1] Duit, R. (2000). A model of educational reconstruction as a framework for designing and validating teaching and learning sequences, Paper presented at the International Symposium "Designing and validating Teaching-learning Sequences in a Research perspective", Paris, November 23-25.
- [2] Duit, R., Gropengieber, et H., Kattman, U. (2005). Towards science education research that is relevant for improving practice: The model of educational reconstruction, in Hans E.
- [3] Johnstone, A.H. (1993). The Development of Chemistry Teaching. *Journal of Chemical Education*; 70(9), 701-705. <https://pubs.acs.org/toc/jceda8/70/9>.
- [4] Johnstone, A.H. (1999). The nature of chemistry, *Education in Chemistry*, 36(2), 45-48.

- [5] Kermen I. (2007). « Prévoir et expliquer l'évolution des systèmes chimiques, observation de la mise en place d'un nouveau programme de chimie en terminale S : réactions des enseignants et des élèves face à l'introduction de l'évolution des systèmes chimiques », Thèse de Doctorat, Université Paris-Diderot-Paris7.
- [6] Kermen, I., et Méheut, M. (2009). Different models used to interpret chemical changes : analysis of a curriculum and its impact on French students' reasoning. *Chemistry Education Research and Practice* ; 10(1), 24-34. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2009/rp/b901457h>
- [7] Kermen I., Méheut M. (2008). Mise en place d'un nouveau programme à propos de l'évolution des systèmes chimiques : impact sur les connaissances professionnelles d'enseignants ; *Didaskalia*, 3 ; 77-116.
- [8] Martinand, J. L. (1992). Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences. Paris, INRP/ LIREST.
- [9] Martinand, J. L. (1994). Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences.
- [10] Martinand, J. L. (1995). Introduction à la modélisation. En didactiques des Disciplines Techniques (126-138), Cachan : Lirest.
- [11] Ouasri, A. (2022). Analyse didactique du programme de chimie au Baccalauréat marocain : Cas de l'évolution des systèmes chimiques, *Revista Electronica de Ensenanza de las Ciencias*, 21(2), 156-180 (2022).
- [12] Ouasri, A. (2023). Analyse épistémologique de l'évolution des systèmes chimiques dans le programme de chimie du Baccalauréat marocain, *Revue Internationale de la recherche scientifique (Revue-IRS)*, 1(3) 288-311. DOI : 10.5281/zenodo.8007795.
- [13] Ouasri, A. (2016). Study of the appropriation by pupils of second Bacculaureate year of knowledge objects relating to acid-bases titrations; *Chemistry: Bulgarian Journal of Sciences Education*, 5(6), 695-717.
- [14] Ouasri, A. (2017). Study of Moroccan pupils' difficulties at second Bacculaureate year in solving chemistry problems relating to reactivity of ethanoate ions and to Copper-Aluminium cell, *Chemistry Education Research and Practice*, 18, 737-748.
- [15] Robardet, G., Guillaud, J.-C. (1994). Élément d'épistémologie et de la didactique des sciences physiques, de la recherche à la pratique, Tome 1. Grenoble : Publication de L'IUFM.
- [16] Robardet, G., Guillaud, J.-C. (1997). Éléments de didactiques des sciences physiques, Paris : Presses Universitaires de France.
- [17] Sinaceur, H. (1999). Modèle, in Dominique LECOURT (dir.), Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences, Paris : Presses Universitaires de France, 649-651.
- [18] Tiberghien, A. (1994). Modeling as a basic for analysing teaching-learning situations. *Learning and Instruction*, 4, 71-87.
- [19] Waliser, B. (1977). Systèmes et modèles, Introduction critique à l'analyse des systèmes, Paris : Éditions du Seuil.