

Tableau 2. Barèmes de valeur de l'énergie

1. Barèmes à base enthalpique (application du premier principe)	
11. Barème « à toutes valeurs égales »	$v_a = v_u = v_r = v_i = v_f = 1$
12. Barème « à rejets de valeur nulle »	$v_a = v_u = v_i = 1; v_r = v_f = 0$
2. Barèmes à base entropique (application du second principe)	
21. Barème « à deux valeurs »	$\begin{array}{c} 2,5 \text{ thermpjes} \rightarrow 1 \text{ kWh} \\ \downarrow \\ v_i = 0,34 \quad v_e = 1 \end{array}$
22. Barème « à valeur de Carnot »	
Ex = Q	$\left[1 - \frac{T_0}{T} \right] \rightarrow v_i = 1 - \frac{T_0}{T}$
3. Barèmes à base technico-économique	
31. Valeur = coût de production	
32. Valeur = prix sur le marché français	
33. Valeur = prix sur le marché international	
4. Barème à base écologique ou socio-politique	
41. Valeur d'utilisabilité : par référence à un écosystème d'utilisateurs urbano-industriels	
42. Valeur de disponibilité : par référence à la dimension et à la facilité d'accès aux ressources	
43. Valeur environnementale : par référence aux nuisances qu'elle entraîne.	
44. Valeur politique : définie par un objectif extérieur, par exemple :	
• désir d'indépendance nationale	
• décision de développer le nucléaire, etc...	

V. Conclusion et bibliographie

Tous les responsables de la formation des ingénieurs sont d'accord sur la nécessité de donner aux élèves-ingénieurs des enseignements à caractère aussi pluri-disciplinaire que possible. A la limite, il n'existe qu'une seule « science de l'ingénieur », c'est la

« Science des Systèmes Industriels », synthèse des aspects matériel, énergétique, informatique, humains et sociaux.

Dans ce cadre, il était souhaitable d'établir des liens entre les enseignements de thermo-

dynamique, de mécanique des fluides et d'économie industrielle. Nous avons cherché à montrer que ceci était possible en insistant sur le concept de « valeur » de l'énergie et en donnant à ce vocable diverses significations à base thermodynamique, économique ou écologique. Cette recherche pédagogique est en cours, à la fois, en formation initiale à l'École Nationale Supérieure des Industries Chimiques et en formation continue, au Centre de Perfectionnement des Industries Chimiques. Nous serions heureux d'échanger des informations avec des collègues procédant à des expériences similaires dans ce même domaine.

Bibliographie

- (1) M. Gouy, *J. Physique*, 2^e série, 1889, 8, 501.
- (2) P. Le Goff (coordonnateur), *Énergétique industrielle*, Vol. I : Analyse thermodynamique et mécanique des économies d'énergie. Éd. Lavoisier, 1979.
- (3) P. le Goff (coordonnateur), *Énergétique industrielle*, Vol. II : Analyse économique et optimisation des procédés. Éd. Lavoisier, à paraître, 1980.
- (4) P. Le Goff, « La valeur de l'énergie a-t-elle une base économique, écologique ou technique » ? *Revue d'Économie Industrielle*, 2^e trimestre, 1979, 68.
- (5) P. Le Goff, « Les rendements d'utilisation de l'énergie par et pour les êtres humains », *Rev. Gén. Therm.*, 1977, 181, 11.
- (6) P. Le Goff, « Optimisation énergétique des procédés industriels », *Rev. Gén. Therm.*, 1978, n° 193, 11 et n° 194, 89.
- (7) P. Le Goff, « Le concept d'unité de dégradation d'énergie et ses applications en mécanique des fluides », *The Chemical Engineering Journal* (à paraître).

Utilisation de techniques audio-visuelles et informatiques pour un enseignement autotutoriel de la distillation. Une expérience pédagogique

par Daniel Cabrol, Stefka Pastour, Robert Luft et Jean-Pierre Rabine

(Groupe de recherche pédagogique en chimie, Institut Polytechnique Méditerranéen, Université de Nice, Parc Valrose, F 06034 Nice Cedex).

Bien que la distillation soit une opération pratiquée quotidiennement au laboratoire de chimie organique, l'enseignement de ses fondements et de sa pratique ne rentre que très rarement dans les programmes de la maîtrise de chimie.

ment classique, qui ne laisse aucune initiative à l'étudiant, de tels documents, comprenant des textes écrits, des montages audiovisuels et des séquences d'Enseignement Assisté par Ordinateur (E.A.O.), constituent dans notre esprit la trame d'un enseignement actif.

• l'étudiant peut travailler à son rythme propre, ce qui facilite l'insertion d'étudiants salariés.

Pour combler cette lacune nous avons cherché à mettre au point des documents de travail qui puissent servir aussi bien dans le cadre d'une formation initiale que dans celui d'une formation professionnelle continue. Plutôt que des compléments d'un enseigne-

La pédagogie qui sous-tend un tel enseignement peut être qualifiée d'autotutorielle, si elle satisfait aux conditions suivantes :

Dans la méthode autotutorielle l'initiative ainsi restituée à l'étudiant appelle en retour un développement de ses motivations et de son sens des responsabilités, par le fait même qu'on lui a rendu la liberté de sa démarche intellectuelle dans l'acte d'assimilation de techniques de raisonnement et de connaissances. On aboutit ainsi, par opposition au mode d'enseignement traditionnel, à une

acquisition « individualisée » du savoir et pour chaque enseigné à un passage harmonieux du concret à l'abstrait.

La méthode autotutorielle nous semble être à la base de l'instauration d'une relation de confiance entre enseignant et enseigné. C'est la raison pour laquelle nous avons tenté de l'appliquer à l'étude de la distillation dont nous décrivons le déroulement dans les paragraphes suivants.

Objectifs didactiques spécifiques

Pour un mélange binaire supposé idéal, l'étudiant devra être capable de :

- déterminer le nombre de plateaux théoriques d'une colonne par la méthode graphique de Mac Cabbe et Thiele,
- dégager les conditions optimales de fonctionnement d'une colonne donnée,
- préciser les caractéristiques d'une colonne requises pour atteindre un degré de séparation fixé à l'avance.

Prérequis et évaluation

Les notions fondamentales portant sur :

- les principes relatifs aux changements d'état du corps pur,
 - la vaporisation des mélanges binaires idéaux,
 - leur séparation par rectification,
- constituent l'ensemble des connaissances de base nécessaires pour entreprendre avec profit cette étude. Pour leur permettre de rafraîchir leur connaissance de ces prérequis, nous avons mis à la disposition des étudiants trois séries de « diaporamas » (projection de diapositives synchronisée avec un texte enregistré sur minicassette).

La réalisation des objectifs est évaluée par l'utilisation de programmes générateurs d'exercices et de simulations sur ordinateur.

Documents didactiques

L'ensemble du matériel d'auto-enseignement mis à la disposition des étudiants comporte :

- une présentation de la distillation à l'aide d'un montage de diapositives sonorisées dans lequel on insiste sur l'importance industrielle du procédé et explicite les objectifs didactiques spécifiques à l'étude proposée. On présente aux étudiants la méthode de travail, ainsi que les documents mis à leur disposition,
- un fascicule de base qui expose les principes de la distillation-rectification des mélanges binaires et détaille également les théories de fonctionnement des colonnes à distiller à flux continu (méthodes de Mac Cabbe et Thiele, ainsi que de Ponchon et Savarit),
- une série de montages de diapositives sonorisées portant sur les prérequis nécessaires à la compréhension du fascicule de base. Ces montages peuvent être utilisés aussi souvent que nécessaire par les étudiants qui le désirent,
- des programmes d'exercices individualisés, générés et corrigés par ordinateur, qui permettent à l'étudiant de vérifier sa maîtrise

des méthodes graphiques et numériques de calcul des colonnes à flux continu,

- des programmes de simulation du fonctionnement de ces colonnes ; ces programmes sont d'un usage extrêmement simple, l'utilisateur est guidé progressivement vers la définition de conditions de fonctionnement satisfaisantes.

Contenu des documents

Document écrit : principe de la rectification (1)

Le fascicule remis à l'étudiant ne constitue pas un document relevant du génie chimique ; il est limité à l'explication du fonctionnement théorique d'une colonne à distiller. Voici le plan suivi :

- A. Principe du fonctionnement d'une colonne de rectification en équilibre.
 1. Mécanisme d'échange au niveau d'un plateau,
 2. Passage d'un plateau à un autre,
 3. Flux et reflux,
 4. Échanges de matières.
- B. Perturbation de l'équilibre d'une colonne adiabatique.
 1. Taux de reflux,
 2. Alimentation en matières.
- C. Théorie du fonctionnement d'une colonne à distiller les mélanges binaires.
 1. Colonne fonctionnant à pression constante sans effet thermique (méthode de Mac Cabbe et Thiele de détermination du nombre de plateaux théoriques),
 2. Colonne fonctionnant à pression constante avec effet thermique (méthode de Ponchon et Savarit).

Documents audiovisuels (2)

Les montages de diapositives sonorisées sont conçus pour permettre une révision de certains éléments de base de la thermodynamique, nécessaires à une bonne compréhension de l'équilibre liquide-vapeur et, par suite, du phénomène de distillation.

Le premier montage (46 diapositives, 20 minutes) traite du changement d'état du corps pur dans le vide. On rappelle la règle des phases en insistant sur la signification physico-chimique de chacun de ses termes. En appliquant cette règle au corps pur, lorsque deux phases sont en équilibre, on introduit l'équation de Clapeyron dont l'application est illustrée par la courbe de vaporisation, de fusion et de sublimation du corps pur. Pour la distillation, il importe de bien comprendre la signification de la courbe relative à l'équilibre liquide-vapeur et des deux domaines qu'elle sépare. A cet effet, deux expériences sont illustrées, l'une à pression constante, l'autre à température constante, dans lesquelles on visualise l'état d'équilibre atteint entre l'eau vapeur et l'eau liquide.

Le second montage (40 diapositives, 20 mi-

minutes) traite de la vaporisation du corps pur, non plus dans le vide, mais dans une atmosphère (gaz inerte). Après avoir rappelé les définitions relatives aux fractions molaires et aux pressions partielles, on illustre l'évaporation d'un liquide dans une enceinte de volume fixe. L'ébullition sous pression constante est ensuite étudiée en s'aidant de la courbe de variation de pression de vapeur saturante, en fonction de la température. On montre ainsi comment distinguer l'évaporation de l'ébullition. Les variations des principales grandeurs thermodynamiques liées aux changements d'état sont ensuite analysées.

Enfin, dans le troisième montage (38 diapositives, 20 minutes), on étudie l'équilibre liquide-vapeur d'un mélange binaire miscible en toutes proportions et formant une solution idéale. Après avoir rappelé rapidement l'allure des diagrammes isothermes, on s'intéresse particulièrement aux diagrammes isobares, en insistant sur l'aspect dualiste des diagrammes en fuseau. A partir de ces derniers on construit la courbe dite d'équilibre qui relie la composition de la vapeur à celle du liquide. L'équation de cette courbe est ensuite établie à partir des lois relatives aux solutions idéales.

Documents informatiques (3)

A. Les programmes d'exercices
Ils fournissent à chaque étudiant des données numériques personnalisées, lui permettant de construire le diagramme isobare correspondant à un mélange binaire idéal particulier. La courbe d'ébullition est calculée en utilisant la loi de Raoult, les tensions de vapeur saturantes des composés purs le sont en utilisant la relation de Clausius-Clapeyron intégrée. Les enthalpies de vaporisation sont obtenues à partir des températures d'ébullition et en appliquant la règle empirique de Trouton. L'étudiant doit déterminer les caractéristiques d'une colonne théorique permettant d'effectuer une séparation donnée. La réponse est contrôlée par le programme qui fournit dans tous les cas un corrigé type.

B. Les programmes de simulation
Les programmes de simulation du fonctionnement des colonnes à flux continu ont été construits suivant des principes pédagogiques que nous avons décrits par ailleurs (4).

Au cours d'une phase interactive l'utilisateur a la possibilité de définir la constitution de la colonne qu'il désire étudier et ses conditions de fonctionnement. L'extrait de liste n° 1 indique quels sont les paramètres sur lesquels l'étudiant peut agir.

Pour chaque paramètre défini, le programme vérifie que la valeur introduite par l'étudiant se situe entre des limites vraisemblables ; si nécessaire il fournit des indications utiles pour la correction : voir extrait n° 2. Enfin, avant de simuler le fonctionnement de la colonne, le programme procède à un nouveau contrôle pour vérifier la cohérence interne de l'ensemble des données introduites.

Extrait n° 1 : Paramètres à actualiser

Soit une colonne à plateaux ($\varnothing = 300$ mm) fonctionnant adiabatiquement, à la pression atm. On introduira, sur le plateau d'alimentation, le mélange binaire supposé idéal, à sa température d'ébullition.

Les codes suivants sont utilisés pour choisir les conditions initiales :

PL.RE : Nombre réel de pl. d'enrichissement
PLEP : Nombre réel de pl. d'épuisement
INFL : % du composé le plus volatil dans l'influx, en poids
TAUX : Taux de reflux
DIST : Débit du distillat, en kg/heure
REFL : Débit du reflux liquide, en kg/heure
VAP : Débit du flux vapeur, en kg/heure
ALIM : Débit de l'influx liquide, en kg/heure
REND : Efficacité moyenne de la colonne en %

Quelle grandeur désirez-vous fixer ?

Extrait n° 2 : Exemple de commentaires de données erronées

Code : DIST Code : VAP Code : REFL
Valeur : 20 Valeur : 100 Valeur : 100

Vérifiez le bilan matière en tête de colonne
Veuillez corriger la donnée erronée

Code : VAP
Valeur : 120
Code : ALIM
Valeur : 10

Le débit de la charge doit être supérieur à celui du distillat
Veuillez corriger la donnée erronée

Code : ALIM
Valeur : 150

Engorgement du bas de colonne ; réduisez l'alimentation
Veuillez corriger la donnée erronée

Code : ALIM
Valeur : 25
Code : TAUX
Valeur : 9

Le taux de reflux doit être égal au rapport REFL/DIST
Veuillez corriger la donnée erronée

Code : TAUX
Valeur : 5

A la fin du processus de contrôle et de correction, l'ordinateur édite un bulletin de résultats qui indique :

- la composition des produits au condenseur et au bouilleur,
- la composition et la température de la phase liquide sur chaque plateau théorique : voir extrait n° 3.

Partant de l'un des mélanges suivants : éthanol/propanol, eau/méthanol, *n*-hép-tane/*n*-hexane, isopentane/*n*-pentane, on peut utiliser ce programme de plusieurs manières, suivant la nature du problème soumis à l'étudiant : étude de l'influence des

divers paramètres sur la séparation, recherche de conditions optimales de fonctionnement, etc...

Déroulement de l'enseignement

Nous commençons le cycle d'enseignement par le diaporama « Présentation de la distillation et de la méthode d'étude ».

L'étudiant se voit alors remettre le fascicule « Principe de la rectification » et nous lui proposons de l'étudier pendant quatre semaines. Pendant ce temps, il a aussi à sa

disposition les trois séries de diaporamas portant sur les prérequis. Notons à ce sujet que nous avons constaté très rapidement (sondage) qu'un grand nombre de nos étudiants présentait des lacunes dans le domaine des prérequis, c'est pourquoi nous les invitons tous à assister à la projection en petits groupes de ces diaporamas.

A la fin de la période d'étude du fascicule, les étudiants, regroupés par binômes, se voient proposer, pour un mélange binaire idéal donné, une série d'exercices individualisés, générés et corrigés par ordinateur.

Après avoir résolu ces exercices, nous demandons à l'étudiant d'analyser le fonctionnement d'une colonne à l'aide d'un programme de simulation. En pesant successivement sur les différents paramètres, l'étudiant peut ainsi vérifier leur influence sur le phénomène de distillation et aboutir, par ajustements successifs, à l'établissement de conditions de fonctionnement optimales. En dernier lieu, nous suggérons à l'étudiant l'examen du degré d'enrichissement d'un ou de plusieurs mélanges binaires idéaux connus, lorsque la colonne fonctionne dans des conditions standard.

En principe, l'étudiant aborde seul la « phase exercice », mais dans la pratique il peut toujours faire appel à un enseignant lorsqu'il se trouve devant une difficulté.

Inversement, l'enseignant peut intervenir quand il constate que l'étudiant se fourvoie. A la fin de l'ensemble des exercices, l'enseignant et l'étudiant font en commun un bilan portant à la fois sur le sujet et son mode d'enseignement.

Analyse interne de cette expérience pédagogique

A ce jour, le module d'enseignement autotutoriel (E.A.T.) que nous venons de décrire a été suivi par près de 150 personnes, à savoir 100 étudiants de maîtrise de chimie en 2 années et 50 professeurs de lycées et collèges dans le cadre d'un cycle de perfectionnement.

Dans la phase de mise au point dans laquelle nous nous trouvons encore, nous n'avons pas voulu dépasser le stade de « l'évaluation interne » de la méthode. Notre analyse a donc porté exclusivement sur l'observation directe du comportement des utilisateurs et sur l'exploitation des rapports anonymes de critiques et suggestions que nous avons sollicités de leur part.

La première partie de cet E.A.T., constituée par les diaporamas sur les équilibres liquide-vapeur et leurs aspects énergétiques, n'a soulevé aucune critique de fond de la part des deux groupes concernés. Cependant, les réactions des enseignants contrastaient avec celles des étudiants. Cela peut s'expliquer par le fait que pour les premiers il s'agissait d'une remise en mémoire de notions acquises depuis plus de dix ans, alors que pour les étudiants celles-ci étaient assimilées depuis peu. De plus, la façon dont des enseignants et

Extrait n° 3 : Bulletin de résultats simulés

Rectification d'un mélange binaire : eau + méthanol

PL. RE	: Nombre réel de pl. d'enrichissement	= 10
PL. EP	: Nombre réel de pl. d'épuisement	= 5
REND	: Efficacité moyenne de la colonne en %	= 80
ALIM	: Débit de l'influx liquide, en kg/heure	= 25
DIST	: Débit du distillat, en kg/heure	= 20
REFL	: Débit du reflux liquide, en kg/heure	= 100
VAP	: Débit du flux vapeur, en kg/heure	= 120
TAUX	: Taux de reflux	= 5
INFL	: % du composé le plus volatil dans l'influx, en poids	= 20

Comp. sortie du condenseur
A : Comp. + Volatil 1.000

B : Comp. - Volatil 0.000

	Plateau Numéro	Comp. liquide sur le plateau (titre molaire)		Température (Celsius)
		A	B	
Tête de colonne	1	0.999	0.001	65
	2	0.996	0.004	65
	3	0.984	0.016	65
	4	0.941	0.059	66
	5	0.811	0.189	68
	6	0.543	0.457	75
	7	0.265	0.735	84
Alimentation	8	0.123	0.877	91
	9	0.036	0.964	97
	10	0.010	0.990	99
	11	0.002	0.998	100
Bouilleur	12	0.001	0.999	100

La colonne fonctionne en état de déséquilibre car le débit de l'alimentation a été mal évalué.

Modifiez ce débit.

ALIM : 163

.....
Cette valeur est trop forte, voulez-vous la modifier en fonction de la valeur limite imposée au débit du distillat.

.....
Voulez-vous modifier la colonne ou ses conditions de fonctionnement : oui

des étudiants perçoivent un même exposé diffère de toute évidence. En particulier, les enseignants ont été sensibles à notre recherche d'un vocabulaire rigoureux et à notre effort pédagogique. Le rythme et la durée de chaque diaporama semblent avoir convenu à la grande majorité des auditeurs. Nous n'avons pas observé de relâchement de leur attention. Mais notre présentation ne semble pas suffisamment interrogative pour inciter l'étudiant à se poser des questions sur la qualité de ses acquis. Nous pensons trouver une solution à ce problème en intercalant des tests d'évaluation formative.

D'une façon générale, le fascicule sur « les

principes de la distillation » a été ressenti comme relativement aride. Les deux groupes regrettent la trop grande abstraction et l'absence d'exemples ainsi que d'exercices. Les étudiants, en particulier, relèvent un « contraste entre la facilité avec laquelle ils ont suivi les diaporamas et la complexité apparente du document écrit ». Pourtant nous nous étions efforcés d'introduire très progressivement et un à un les facteurs physiques qui interviennent dans la théorie de la rectification. Nous n'avons pas jugé nécessaire d'introduire des exercices à la fin de chaque paragraphe, car la simulation d'une distillation qui fait suite à l'étude du document écrit devrait permettre de réaliser

des applications numériques nombreuses pour l'ensemble du domaine étudié.

La critique du fascicule sur « Les principes de la distillation » par la quasi-unanimité des étudiants montre que nous avons probablement surestimé leur capacité à fournir seuls un effort soutenu, lors de l'acquisition de grandeurs et de relations à représentation mathématisée. On peut se demander si l'une des causes de cette difficulté d'assimilation ne réside pas dans l'environnement audiovisuel quotidien, où l'image est devenue un support privilégié de communication.

Comme nous l'avons déjà observé pour d'autres chapitres de la chimie (cinétique en particulier), l'Expérimentation Scientifique Simulée sur Ordinateur (ESSOR) bénéficie de l'effet de « halo » lié à l'accès personnel de l'étudiant à l'ordinateur. Ce préjugé favorable facilite la prise de contact avec le système (usage du clavier, façon d'introduire des données et de poser des questions). La phase interactive de contrôle des données introduites librement par l'étudiant et qui précède la simulation les amène rapidement à ressentir la nécessité de préciser rigoureusement les relations existant entre les diverses grandeurs caractéristiques du fonctionnement des colonnes. Cet aspect « réaliste » éclaire, dans une certaine mesure, les points délicats du document écrit ; la grande multiplicité des « essais » qu'ils peuvent entreprendre leur permet de bien saisir l'imbrication étroite des différents facteurs qui influent sur la bonne marche de la colonne. Convenablement guidés dans un premier temps, ils parviennent rapidement à développer de façon autonome leur plan de travail. Si cette liberté est incontestablement un facteur positif dans l'apprentissage de la « prise de décision », il faut cependant craindre que l'apparente facilité avec laquelle les résultats sont obtenus ne motivent pas spécialement les étudiants pour approfondir leur connaissance des principes exposés dans le document écrit.

Bibliographie.

- (1) Fascicule disponible, participation aux frais 10 F.
- (2) Quelques exemplaires des trois montages audio-visuels sont encore disponibles contre participation aux frais de 500 F.
- (3) Les listes des programmes pour ordinateur PDP 8/E sont disponibles en langages FOCAL. Une version pour micro-ordinateur PET ou CBM en langage BASIC est en cours d'élaboration. Participation aux frais 10 F.
- (4) Daniel Cabrol, Claude Cachet et José Basso, *J. Chem. Educ.*, 1975, **52**, 266. Daniel Cabrol et Claude Cachet *L'actualité chimique*, 1977, **1**, p. 36.