

## Enseignement assisté et simulation en analyse qualitative minérale

par Jean-Jacques Kessis,  
Jean Martin

et Jean-Pierre Ciabrini  
(Laboratoire « Ordinateur pour étudiants », Université Paris 7, 2, place Jussieu, 75221 Paris Cedex 05)



J.J. Kessis

Dans le cadre d'un enseignement de Chimie minérale en seconde année du premier cycle scientifique, il est apparu intéressant d'expérimenter l'insertion de l'ordinateur. Dans le programme de l'Unité de Valeur en cause, c'est spécifiquement à l'analyse des cations en solution que nous nous sommes intéressés. La méthode classique, dichotomique, avec séparation en groupes, est employée en Travaux Pratiques.

Il n'est peut-être pas inutile, avant toute référence à l'ordinateur, d'expliquer le choix de cette méthode « démodée » plutôt que des méthodes non systématiques qui appliquent d'emblée à la liqueur primitive un réactif spécifique du cation recherché. Il est certain que ces dernières, plus récentes et sans doute plus rapides, peuvent être préférées lorsqu'il s'agit d'« instruire » des analystes spécialisés. Mais l'emploi assez stéréotypé de complexants et de réactifs organiques rares ne nous paraît guère de nature à élucider les phénomènes de la chimie des solutions ioniques.

Par ailleurs, les séparations successives aboutissant, aux extrémités de l'arborescence, à des fractions pures, nous semblaient pouvoir renforcer un esprit de logique et de méthode qu'on croirait acquis depuis l'enfance si l'expérience de l'enseignement ne le démentait quotidiennement.

Cela dit, les résultats de l'enseignement traditionnel — travaux dirigés et travaux pratiques — tels qu'ils apparaissaient lors du contrôle continu, ne répondaient pas entièrement à ces espérances. Sans doute la brièveté des semestres universitaires et la multiplicité des centres d'intérêt des étudiants y étaient-elles pour quelque chose. En tout cas, l'analyse était souvent pratiquée comme une « recette » suivie pas à pas sur le polycopié tandis que les implications chimiques fondamentales n'étaient pas plus ressenties que l'articulation logique de la méthode. C'est dans l'espoir de donner aux étudiants une vision moins « terre à terre » des phénomènes que l'insertion de l'ordinateur a été entreprise dans cet enseignement.

### 1. Dialogues d'enseignement assisté

Pour améliorer la compréhension des phénomènes chimiques fondamentaux, nous avons fait appel aux possibilités de programmation didactique en Langage Auteur offertes par le Système de l'O.P.E., à l'élaboration duquel l'un de nous a participé. Ce système, et notamment les divers programmes évolués d'Analyse de Réponse qui font son originalité, a déjà été décrit à plusieurs reprises au cours de son développement entrepris en 1967. Dans l'état actuel de son évolution (1), il permet la construction de Dialogues très souples et très ouverts, présentant les avantages classiques de la Programmation Didactique sur Ordinateur : adaptation à la cadence de l'étudiant, correction spécifique et immédiate de ses erreurs, trajet personnalisé apportant à chacun les compléments d'information dont il a besoin : états statistiques enfin qui offrent à l'enseignant un instrument de mesure précieux des résultats de son activité. L'Analyse Verbale, qui a été choisie ici, permet de prendre en compte un vaste ensemble combinatoire de réponses possibles, autorisant ainsi une réponse assez libre de la part de l'étudiant, à l'exclusion de tout choix multiple.

L'ensemble comporte sept Dialogues (un Dialogue correspond à un temps d'interaction au terminal d'une à deux heures, selon la cadence de l'étudiant) dont le premier concerne les Essais Préliminaires et les deux suivants les Principes de la Séparation en Groupes; trois autres concernent l'Analyse Interne des Différents Groupes.

Les principaux points de chimie fondamentale soulignés au cours de ces dialogues sont les suivants : Produit de solubilité et influence du pH; séparations par déplacement; coloration et structure électronique des Éléments de Transition; complexes; utilisation des propriétés chimiques caractéristiques.

Des diapositives présentées automatiquement illustrent les textes, ce qui est important dans un enseignement présentant des aspects pratiques.

Une question délicate est celle du point d'insertion des passages sur ordinateur dans l'enseignement traditionnel : Les nôtres ont été conçus pour s'insérer après les Travaux Dirigés et les Travaux Pratiques, agissant ainsi à la fois comme complément d'enseignement, évaluation des connaissances et des lacunes, correction des erreurs et incitation à la réflexion fondamentale. Les États Statistiques en sont le sous-produit, utilisable pour améliorer à la fois l'enseignement traditionnel et les Dialogues eux-mêmes.

## 2. Système de simulation

La conduite d'une analyse en Travaux Pratiques demande environ quatre heures. Cela explique en partie le manque de perception globale par les étudiants d'un processus trop étendu dans le temps ; il ne leur est pas possible, en outre, d'acquérir une pratique suffisante au cours des quelques séances consacrées à l'Analyse Qualitative. Il paraissait donc utile de mettre en œuvre une Simulation permettant d'exécuter rapidement (dix minutes par liqueur) et sans être arrêté par des difficultés manipulatoires, de nombreuses analyses sur des liqueurs inconnues variées. Nous en attendions une meilleure compréhension de la logique de la méthode, et une pratique visuelle, grâce à l'emploi de diapositives, des différentes réactions caractéristiques.

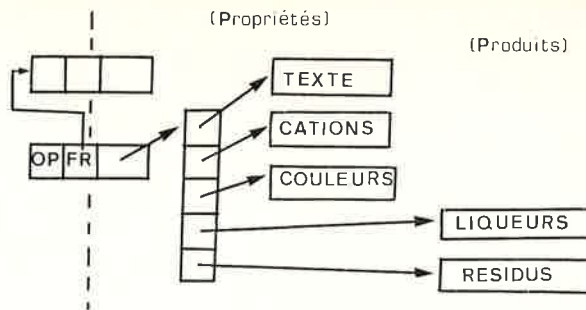
La question de la place de la simulation dans notre enseignement ne se pose pas vraiment : il est clair qu'elle doit se situer immédiatement avant la première séance de travaux pratiques. On peut espérer éviter ainsi, lors du passage au Laboratoire qu'il n'est évidemment pas question de supprimer, les erreurs et tâtonnements du comportement « culinaire » précédemment observé, et l'incompréhension que ce comportement manifeste.

### Architecture du sous-système

D'autres paramètres, tels que les degrés d'activité relatifs de l'étudiant et du Système en cours de Simulation, sont moins faciles à fixer a priori. C'est pourquoi la réalisation devait présenter une certaine souplesse à ce niveau. Aussi, plutôt que de programmer la simulation rigide d'un processus particulier, un véritable Sous-Système de Simulation a été construit. De conception modulaire, il exploite un programme écrit dans un Langage spécialisé (L.S.). Ce langage a été conçu pour décrire toute méthode d'analyse chimique systématique reposant sur les séparations successives, et pourrait sans doute s'étendre à d'autres processus dichotomiques similaires.

Programmé en Langage Assembleur 360, le Sous-Système est articulé autour d'un interpréteur (Figure 1), lui-même en relation, par l'intermédiaire d'un module d'Interface,

## PROGRAMME L.S. LISTES STATIQUES . LISTES DYNAMIQUES



avec le Système Général de l'O.P.E., dont il utilise les services en matière de télécommunications et de multiplexage des messages. La Simulation est ainsi simultanément disponible, en réponse à une commande appropriée (\*ANA), sur tous les terminaux, locaux ou éloignés, qui se trouvent connectés. Il est préférable, mais non indispensable que chaque terminal soit muni d'un passeur de diapositives.

La fonction des divers modules en relation avec l'Interpréteur sera précisée dans ce qui suit.

### Le langage spécialisé

La mise sur ordinateur d'un processus arborescent paraît immédiate. Il faut cependant voir que la suite d'actions d'une analyse ne se ramène pas exactement à un programme au sens de l'informatique. En effet, si le parcours de l'information, linéaire, est finalement très analogue, avec des tests et des sauts, il est accompagné d'un flux de matière qui peut être ramifié, et qui subit des transformations.

Il s'agit donc de réduire la méthode d'analyse à une suite d'actions. Il est certain que cela ne va pas sans schématisation. Ainsi, on peut dire qu'il y a séparations successives le long d'un parcours arborescent, dont les extrémités libres représentent des fractions pures, ne pouvant contenir qu'un seul des ions recherchés ; la fraction pure est alors soumise à un ensemble de tests spécifiques de cet ion, ensemble que l'on peut représenter par une action unique, l'Instruction Test (T), ayant comme opérandes la fraction pure considérée, l'ion recherché et éventuellement une adresse de saut permettant de ne pas exécuter certaines des actions suivantes du programme qui sont superflues si le test s'avère négatif. Par exemple, si le Test concernant le Cuivre s'avère négatif, il est inutile de complexer l'ion  $Cu^{++}$  par le Cyanure avant la recherche du Cadmium. En réalité, la détermination n'est pas si localisée : au laboratoire, de nombreuses inférences annoncent la présence de certains ions avant leur caractérisation finale.

Comme dans toute modélisation, certains aspects contingents ont disparu. Mais l'étudiant pourra retrouver en Travaux Pratiques toute la complexité des situations réelles.

Il est intéressant de remarquer que dans ces conditions la méthode se réduit à un très petit nombre d'actions élémentaires, les Instructions. Chaque Instruction est contenue dans un mot-machine qui comporte (figure 2) un code opération (OP), l'indication de la fraction (FR) sur laquelle l'instruction agit (cette fraction ayant été créée par une instruction précédente, FR est en réalité un pointeur sur celle-ci, accompagné d'un indicateur binaire d'état physique : liquide ou précipité) et généralement un chaînage vers des informations complémentaires, organisées selon les techniques classiques de traitement de Listes.

L'instruction fondamentale est celle de Séparation (code opération S) ; la structure des informations associées est celle représentée sur la figure 2. Le chaînage permet d'accéder à des Listes Statiques exprimant les propriétés chimiques en jeu : nom du réactif employé, cations susceptibles de précipiter et couleurs des fractions solides produites. L'interprétation de l'instruction — l'exécution de l'action chimique — crée, dans une zone dynamique, d'autres listes dont le contenu dépend de la Liqueur Primitive analysée. Ces listes expriment l'état du flux de matière après l'action chimique de précipitation, c'est-à-dire la composition de la fraction solide produite et celle de la fraction liquide surnageante.

Le Groupage (G) est une instruction dont la logique est identique. Il marque les grandes articulations en groupes de la méthode. Le Mécanisme du Complexage (C) diffère peu de celui de la Séparation : tout se passe comme si les ions concernés, devenus inaccessibles, étaient retirés de la solution sans production d'une fraction solide.

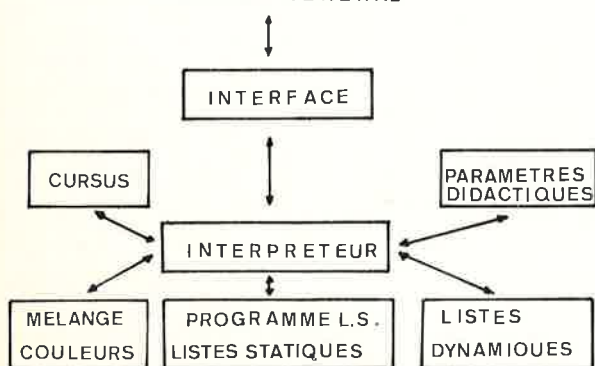
L'instruction Test a déjà été décrite. Des instructions de saut inconditionnel (B) et conditionnel (J) existent. Une instruction Axiome (A) amorce le programme ; elle est en relation avec la Liste décrivant la Liqueur Primitive.

Les instructions du L.S. ont été implantées en faisant usage du Langage de création de Macro-Instructions associé à l'Assembleur 360.

### Les modules d'options didactiques

L'interpréteur est susceptible de réaliser une analyse, à partir d'une Liqueur Primitive donnée, de façon entièrement automatique. Les actions successives seront imprimées sur le terminal, et les vues associées correspondantes projetées. Évidemment, il est préférable de choisir des modes d'interaction où l'étudiant est plus actif, et cela est possible en fixant les « paramètres didactiques » à l'aide du module de ce nom. Dans une première expérimentation, nous avons choisi de faire exécuter par l'Automate les diverses Séparations, laissant à l'étudiant le soin d'effectuer, à l'aide de commandes convenables, les Tests Spécifiques qui s'imposent. En cas de choix correct, une vue décrivant ces tests est envoyée, ce qui accoutume l'étudiant aux aspects visuels de la méthode. Une autre option qu'il vaut mieux laisser ouverte et ajuster par l'expérience en fon-

### SYSTEME GENERAL

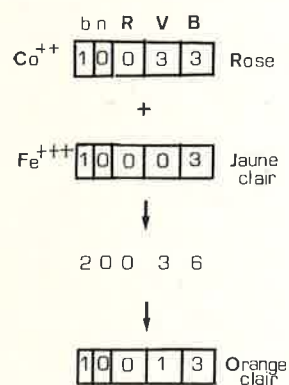


tion de l'auditoire est celle de la séquence d'enseignement, c'est-à-dire ici du choix des liqueurs successives présentées à l'étudiant au cours d'une séance de simulation. C'est le rôle du module « cursus » qui permet de choisir le nombre de cations présents dans les liqueurs successives, et la nature de ces cations. On peut également fixer seulement le nombre d'ions, les liqueurs étant alors tirées au hasard; on peut également combiner les deux modes.

### Le mélange des couleurs

Au cours de l'analyse, les diverses fractions solides ou liquides qui apparaissent sont constituées de mélanges de produits colorés. L'Automate doit pouvoir rendre compte de la couleur résultante de tels mélanges, quel que soit le nombre des produits. Cette exigence particulière de notre simulation pose un problème qui n'est pas sans intérêt, dans la mesure où l'on ne peut plus se contenter d'un codage arbitraire des couleurs: il faut faire appel à un modèle physique représentant les propriétés des corps colorés.

Les phénomènes physiques en cause sont connus (2), quoique diversement décrits en raison de la variabilité du vocabulaire et des systèmes de représentation. La couleur des corps résulte de leur absorption inégale dans les différentes régions du spectre. On dit que les mélanges sont *soustractifs*: ce sont les absorptions qui s'ajoutent, contrairement à ce qui se passe pour les mélanges de lumières. Cela est bien connu dans l'Imprimerie et dans la Peinture, où il en résulte un certain assombrissement global; cette constatation est d'ailleurs l'un des fondements théoriques de l'Impressionnisme. On a choisi ici de coder la *teinte* par l'absorption, notée de 0 à 3, dans trois secteurs du spectre: rouge, vert, bleu. Ce n'est pas le seul facteur physique à considérer: le *degré de pureté* (couleur pure: 0; lavée de blanc: 1) et la *clarté* (clair: 0; foncé: 1) sont également codés. Chaque couleur est ainsi représentée par un octet. Ce codage minimal reste suffisamment nuancé pour le but recherché. Le mélange de plusieurs couleurs est alors obtenu par l'addition verticale des cinq régions de l'octet, suivie d'une normalisation qui produit un octet résultant à partir duquel le nom de la couleur obtenue est décodé.



Des aménagements ont été apportés pour tenir compte, d'une part de légères différences de comportement entre les liquides et les solides opaques, et d'autre part des curieuses propriétés du vocabulaire usuel dans ce domaine. Par exemple, une couleur à la fois *lavée* et *foncée* est dite techniquement *rabattue*; ce terme non courant ne serait pas parlant; une approximation est *grisâtre* qui est bien compris pour les couleurs froides, mais choque pour un rouge rabattu, qui sera plutôt dit *brunâtre*.

Le module réalisé selon ces principes rend bien compte des phénomènes pratiquement observés, ce qui autorise les étudiants à pratiquer, comme au Laboratoire, des observations globales qui guident leur analyse.

### 3. Résultats pédagogiques

Après une première expérimentation à petite échelle en 1974 avec des volontaires, notre système a été intégré dans le cursus (unité de valeur DD 212) en 1975. Notre idée de base était de dissocier les trois ordres de difficultés que rencontrent les étudiants dans ce type d'enseignement; à savoir, perception de la structure logique globale de la méthode d'une part, problèmes pratiques de manipulation d'autre part, justification des procédés d'analyse par la Chimie Fondamentale enfin. C'est pourquoi nous avons conçu notre enseignement intégré en trois étapes: passage sur ordinateur en simulation; travaux pratiques au laboratoire (il n'est pas question de réduire cette phase indispensable); enfin, réflexion sur la Chimie au moyen de Dialogues d'Enseignement assisté.

Pour cette première année d'utilisation en vraie grandeur, et à des fins d'expérimentation, une partie seulement des étudiants (36) a pratiqué la Simulation (Groupe S) dès le 10 avril.

Chacun d'entre eux a réalisé en moyenne quatre analyses simulées sur des liqueurs préparées ou tirées au hasard. Groupés en binômes sur les terminaux, les étudiants ont manifesté une grande activité, apparemment stimulés par l'aspect « jeu de découverte » du système de simulation.

Les Travaux Pratiques d'Analyse qualitative se sont déroulés du 14 avril au 29 mai. Les autres étudiants (44) (groupe T) sont passés en Dialogues d'Enseignement assisté les 15 et 16 mai.

On peut donc considérer ce second groupe comme un groupe témoin en ce qui concerne les résultats du passage en Simulation, estimés lors des premières séances de Travaux Pratiques. Conformément à notre attente, la dissociation de l'aspect logique (en simulation) de l'aspect pratique (aux T.P.) et la rapidité des analyses simulées ont donné aux étudiants du groupe « Simulation » une vue globale de la méthode arborescente; cela leur a permis de commencer immédiatement leur analyse en ne demandant que des renseignements opératoires, alors que dans le groupe « Témoin », le comportement habituel de tâtonnement incompréhensif (en suivant le polycopié comme une recette de cuisine) se manifestait, avec de nombreux appels aux enseignants.

Il n'était évidemment pas question de laisser le groupe témoin sans aide pour les besoins de l'expérience. C'est pourquoi les résultats chiffrés des analyses sont biaisés et marquent assez peu la différence importante dans la performance initiale:

Groupe S: 45% de résultats totalement exacts.

Groupe T: 30% de résultats totalement exacts.

Plus significative est la différence de durée moyenne de l'analyse. Les liqueurs inconnues ont été analysées dans le groupe T en un temps moyen de quatre heures; dans le groupe S, les étudiants ont terminé en moyenne en 2 h 30, ce qui leur a permis de rechercher en outre les anions et d'analyser complètement une seconde liqueur inconnue.

Le passage en Dialogues d'Enseignement Assisté, conçu pour faire réfléchir les étudiants sur les aspects de Chimie Fondamentale de la méthode, est encore trop récent

pour qu'on en tire des impressions autres que subjectives.

L'enseignement assisté par ordinateur apporte ici paradoxalement une certaine personnalisation du travail en s'adaptant à la cadence et au niveau individuels. Comme en simulation, on constate ici un comportement plus actif et plus intelligent des étudiants concernés; cela est souvent difficile à obtenir par d'autres moyens, compte tenu de la brièveté des semestres, du nombre des étudiants et de la dispersion de leurs activités.

On se pose parfois la question de la réaction des étudiants en face d'un système informatique d'enseignement. Huit ans d'expérimentation à l'OPE nous ont montré qu'il s'agissait là d'un faux problème: l'apprentissage de l'interaction au clavier est vite fait, et le dialogue s'établit très naturellement entre l'étudiant à son terminal et les programmes didactiques. La conception de ces programmes fait appel à la fois à la compétence scientifique et au sens pédagogique des enseignants; une expérience de l'enseignement traditionnel est indispensable.

### Conclusion

L'expérience est loin d'être terminée. Si le système de simulation est au point, on peut envisager des versions plus élaborées. Du travail reste à faire en matière de matériel audio-visuel (diapositives). Les sept dialogues qui ont été rédigés (qui représentent en moyenne dix heures d'enseignement assisté) devront être perfectionnés en analysant les résultats enregistrés de l'interaction au terminal.

Les résultats déjà obtenus nous incitent à poursuivre dans la même voie. L'observation des étudiants, au niveau d'un C4 par exemple, met en évidence de graves lacunes dans leur formation de base en Chimie. Ces lacunes sont très variables en localisation et en importance d'un étudiant à l'autre en raison sans doute des variations personnelles et de la souplesse actuelle des cursus. Un recyclage traditionnel de type collectif ne peut résoudre cette difficulté. Il apparaît donc plus efficace de mettre à la disposition des étudiants un système d'enseignement adaptatif susceptible de répondre de façon personnalisée à leurs besoins.

Nous comptons faire usage des moyens visuels disponibles en liaison avec l'ordinateur: projecteur de diapositives et écran cathodique à mémoire. Ce dernier appareil se prêtera particulièrement à la simulation des phénomènes physico-chimiques.

Dans le prolongement de la présente expérience, nous examinerons d'abord les phénomènes intervenant dans les solutions ioniques (pH, solubilité, oxydoréduction, constantes de stabilité). D'autres développements sont envisagés par la suite.

### Remerciements

Ce travail a été soutenu en 1973-1974 par le service de la Rénovation Pédagogique de l'Enseignement Supérieur (Secrétariat d'État aux Universités).

Nous tenons à remercier par ailleurs M. Gunot, Mlle Hugues et Mme Petitjean pour leur aide matérielle, notamment dans la préparation des documents visuels.

### Bibliographie

- (1) Adam, Jacoud, Jacques, Kessiss, Pelle-treau, Penné, Rambaut, Toulouse. A Current CAI Project: The OPE System. IFIP 74, Stockholm-North-Holland Publishing Company, 1974.
- (2) Deribéré, *La Couleur*, P.U.F., Paris, 1964.