

# La “ microchimie ” : une approche novatrice de l’enseignement expérimental de la chimie

**Nicolas Cheymol**  
Professeur agrégé  
Lycée Louis Le Grand  
75005 Paris.

**Richard-Emmanuel Eastes \***  
Professeur agrégé  
Ecole normale supérieure  
75005 Paris.

**Michaël Hoff**  
Professeur agrégé  
Lycée aux Lazaristes  
69005 Lyon.

## Résumé

On regroupe sous la dénomination de “ microchimie ” une nouvelle pratique expérimentale dont le concept modifie considérablement l’approche pratique de l’enseignement de la chimie grâce aux multiples avantages dont il bénéficie par rapport aux techniques traditionnelles.

Le principe de la microchimie est simple : il consiste à réduire l’échelle des manipulations usuelles par un facteur variant de 10 à 100. Cela a pour effet de minimiser à la fois les dangers liés à l’utilisation des produits chimiques, la production de polluants et leur rejet dans l’environnement, ainsi que l’ensemble des coûts relatifs à la mise en œuvre des séances de travaux pratiques dans les laboratoires d’enseignement des lycées et de l’enseignement supérieur (achat et stockage de réactifs chimiques, de solvants et de verrerie, retraitement des déchets...).

Ces techniques présentent par conséquent un intérêt pédagogique formidable, car elles permettent d’aborder des réactions qui n’étaient pas envisageables jusqu’à présent, aussi bien pour des problèmes de sécurité que pour des raisons financières. En outre, alors qu’elles sensibilisent les élèves à la nécessité de protéger leur environnement, elles simplifient la mise en œuvre des manipulations les plus complexes, tout en initiant les étudiants à une certaine exigence de soin et de minutie, imposée par l’utilisation de petit matériel. A ce titre, elles sont à l’origine d’une façon plus actuelle de considérer l’enseignement de la chimie expérimentale.

## Mots-clefs

Enseignement expérimental, petites quantités, sécurité, coûts réduits, environnement, outil pédagogique, chimie moderne.

## Abstract : Microscale chemistry : a modern concept in experimental chemistry teaching.

There is a new experimental practice that comes under the name of microscale chemistry, the concept of which considerably modifies the practical approach to teaching chemistry, thanks to a number of advantages it has compared with traditional techniques.

The principle of microscale chemistry is simple: it consists of reducing the scale of routine experiments by a factor of 10 to 100. This means that the dangers associated with the use of chemical products and the production of pollutants and their discharge into the environment are minimized. In addition, the overall costs of organizing laboratory workshop sessions in schools and in higher education (buying and storing chemical reactants, solvents, glass vessels and reprocessing waste material...) are also minimized.

These techniques therefore offer enormous teaching interests as they enable one to tackle any reactions which, up until now, were not possible due to both security problems and financial matters. Furthermore, while increasing pupils’ awareness about the need to protect their environment, these techniques also simplify the implementation of more complex experiments, and at the same time introduce students to the importance of meticulous care, imposed upon them by the use of small materials. In this respect, these techniques are the basis for a more up to date method of teaching experimental chemistry.

## Key-words

Education, experimental teaching, microscale chemistry, safety, low costs, environment, pedagogical tool.

## A. PROBLEMATIQUE

### I. La microchimie au XXI<sup>ème</sup> siècle : un avènement inéluctable

Depuis les années 70, en dehors des synthèses préparatives, les quantités de produits chimiques utilisées en recherche comme en enseignement n'ont cessé de diminuer, pour atteindre un seuil imposé par la taille des instruments traditionnels (100 mg à 1 g en moyenne pour une synthèse) ; ce seuil se réfère à ce que dans la suite de l'article nous nommerons « échelle usuelle », qui correspond à la pratique de la chimie « de type macro ».

Aujourd'hui, l'attention croissante portée aux problèmes de sécurité et les interrogations liées à l'impact des émanations des laboratoires (vapeurs et déchets condensés) sur la santé et l'environnement incitent à tenter de réduire au maximum la production de substances potentiellement dangereuses, ainsi que l'exposition des élèves et des enseignants à ces substances.

Les progrès effectués dans les domaines de pointe de la chimie rendent le problème encore plus crucial, dans la mesure où l'introduction dans l'enseignement de réactifs pouvant présenter des toxicités ou des coûts élevés, tels que les composés de coordination des métaux de transition ou les composés chiraux, devient peu à peu nécessaire pour illustrer les avancées majeures de la chimie.

Afin de permettre aux lycées de respecter les exigences de nouveaux programmes de plus en plus orientés vers l'enseignement pratique, il est indispensable de mettre en œuvre toutes les méthodes susceptibles d'entraîner la réduction des achats de matériel et de produits chimiques, et par suite la réduction des coûts liés au retraitement des déchets.

Ces quelques réflexions conduisent tout naturellement à tenter de travailler à la plus petite échelle possible. Aussi la microchimie semble-t-elle apporter un certain nombre de réponses adaptées à ces problèmes, en permettant de diviser par 10 à 100 les quantités de réactifs utilisés traditionnellement, grâce à une miniaturisation ingénieuse de l'ensemble des instruments fondamentaux utilisés en chimie expérimentale.

Dans les pays en voie de développement par ailleurs, les enseignements secondaire et supérieur constituent souvent la clef des progrès futurs des sociétés. Or les moyens financiers faisant cruellement défaut dans la plupart des cas, c'est évidemment l'enseignement expérimental qui souffre le plus du manque de crédits, et rares sont les étudiants qui réalisent plus d'une séance de manipulations au cours d'une année scolaire ou universitaire.

Là encore, la microchimie peut apporter des solutions, sans pour autant mettre en œuvre du matériel miniaturisé spécialisé. Et en effet, la microchimie se développe actuellement non seulement dans les pays industrialisés, mais partout dans le monde et à tous les niveaux scolaires, des lycées aux universités.

### II. Les apports de la microchimie à l'enseignement

Le succès des techniques de microchimie tient à plusieurs avantages [1], dont certains ont déjà été évoqués. Ils se divisent en quatre catégories :

#### 1. Le renforcement de la sécurité

Il s'agit sans aucun doute du principal avantage pratique que présente la chimie en petites quantités, et il revêt plusieurs aspects.

Le plus immédiat est lié à la réduction du contact de l'expérimentateur avec les produits chimiques, qu'il s'agisse de composés corrosifs et irritants (acides, bases, lacrymogènes), toxiques (organométalliques, solvants chlorés, aromatiques), ou simplement nauséabonds (alcènes, composés soufrés). Cet avantage peut être exploité de deux manières différentes : de prime abord, il assure un accroissement de la sécurité pour les manipulations classiques, et trouve son intérêt essentiellement dans l'enseignement secondaire ; en second lieu, un aspect plus intéressant pour l'enseignement supérieur consiste à tirer parti de la réduction des risques qu'entraîne l'utilisation de micro-quantités, pour élaborer des expériences qui mettent en jeu des composés dont le danger potentiel rend rédhibitoire l'utilisation courante dans les expériences de type « macro ».

De même, la miniaturisation des expériences entraîne une forte diminution des risques d'incendies ou d'explosions, aussi bien dans les fioles de réaction (1 à 10 mL) que dans les « poubelles à solvants », remplacées par des récipients de faible contenance.

Plus spécifiquement, le remplacement des traditionnels bains d'eau ou d'huile techniques dangereuses et peu commodes - par de petits bains de sable très faciles à fabriquer, est à l'origine d'un gain de sécurité considérable.

Enfin, le stockage des solvants, propres ou souillés, prend lui aussi une toute autre dimension, puisqu'il n'est plus nécessaire de conserver des litres de composés inflammables dans des armoires souvent mal protégées des sources d'ignition, ni d'entreposer en des lieux inadéquats des bidons de 10 litres de solvants usagés en attendant l'arrivée du transporteur. Un litre de solvant suffit en effet pour réaliser 10 à 20 séances de travaux pratiques.

## **2. La protection de l'environnement [2]**

Dans un laboratoire d'enseignement comme dans une unité de recherche, la division par 10 à 100 des quantités de solvants et de réactifs chimiques réduit d'autant la pollution de l'eau et de l'air après les opérations de vidange ou d'incinération des déchets. Ce point est fondamental pour certains types de composés comme les sels de métaux lourds ou les dérivés halogénés.

Il faut noter, en outre, que la réduction des quantités de produits utilisés en travaux pratiques permet dans bien des cas de recycler simplement déchets et solvants usés, plutôt que de les incinérer. En effet, songeons à la quantité de solvant souillé issue d'une séance de travail mettant en œuvre la réalisation d'une expérience de microchimie réalisée par une dizaine de binômes. Typiquement, pour une synthèse organique, 2 à 10 mL de solvant sont nécessaires pour la réaction, et à peu près autant pour l'extraction et la purification. En considérant que chaque binôme utilise de 5 à 20 mL en tout et pour tout, la quantité totale produite est de 50 à 200 mL ! Il est alors très aisé de recycler ce solvant à l'aide d'un dispositif de distillation placé à demeure dans le laboratoire sous une hotte ventilée réservé à cet usage.

Non seulement la quantité de solvant utilisée a été divisée par 5 à 20, mais de plus, cette réduction en a permis le recyclage partiel, ce qui constitue un succès supplémentaire dans la protection de l'environnement.

## **3. La diminution des coûts**

La réduction des coûts relatifs à l'achat des réactifs et des solvants ainsi qu'au retraitement des déchets a déjà été évoquée, et les aspects présentés plus haut en matière de protection de l'environnement ont également des répercussions favorables sur les budgets. Les économies doivent bien entendu être comparées aux frais que représente l'approvisionnement d'un laboratoire en petit matériel ; nous verrons plus loin comment réaliser cette opération, et surtout comment l'opérer à moindre coût. Mais d'autres économies peuvent encore être réalisées dans plusieurs domaines.

En premier lieu, si l'emploi de micro-quantités permet l'utilisation sans risque de produits potentiellement dangereux comme cela a été évoqué plus haut, la microchimie rend également possible la réalisation de réactions à base de composés coûteux comme les métaux de transition (platine, palladium, rhodium...) ou les substances organiques optiquement pures, ce qui permet la conception de nouveaux TP axés sur la chimie fine moderne (chimie organométallique, synthèse asymétrique, etc.).

De plus, il existe pour la synthèse élaborée des kits de micromatériel [1] peu onéreux au regard des pièces de verrerie qu'ils contiennent, dont tous les éléments sont rodés et s'assemblent grâce à des bagues de serrage filetées, ce qui permet la fixation par une seule pince. Les montages gagnent ainsi en solidité et se désarticulent moins facilement.

## **4. L'intérêt pédagogique**

La description ci-dessous de quelques expériences réalisables en petites quantités montrera que la crainte de voir la microchimie dénaturer l'expérimentation chimique est loin d'être justifiée. Il se trouve qu'en outre, plusieurs aspects en rendent la pratique enrichissante d'un point de vue pédagogique.

Le petit matériel introduit d'importantes simplifications dans l'emploi des techniques courantes, grâce à une meilleure maniabilité du matériel. C'est par exemple le cas pour la distillation fractionnée ou la synthèse magnésienne. La simplification des gestes à effectuer lors de la réalisation d'un montage et de l'introduction des réactifs permet alors aux élèves de se concentrer davantage sur l'essentiel, c'est-à-dire sur la problématique de la manipulation, la compréhension du mode opératoire, l'observation attentive des phénomènes mis en jeu à toutes les étapes de la manipulation, et l'interprétation des résultats.

Cette simplicité, conjuguée à un aspect ludique indéniable, contribue à procurer à la chimie expérimentale une image attrayante auprès des étudiants, ce qui constitue un progrès pédagogique manifeste.

D'autre part, confrontés à un matériel qui nécessite plus de minutie que le matériel de taille supérieure, les élèves prennent rapidement conscience de l'importance de maîtriser tout risque de perte de produit et toute source d'incertitude de mesure. Par suite, il a été observé qu'ils devenaient beaucoup plus soigneux dans toutes leurs manipulations, quelle que soit l'échelle à laquelle sont réalisées les expériences, et même dans d'autres matières comme la physique et la biologie.

En ce qui concerne la nature des expériences, la microchimie permet encore d'améliorer la qualité des sujets de travaux pratiques pour essentiellement deux raisons. La première a déjà été évoquée : l'utilisation de micro-quantités rend possible l'emploi de substances plus onéreuses ou plus dangereuses, à des niveaux de coût ou de sécurité analogues à ceux des expériences traditionnelles effectuées en mode « macro », dont résulte un élargissement de la gamme et de l'intérêt des manipulations réalisables. La seconde raison est liée au gain de temps que procure la réduction de la taille des expériences. La mise en œuvre d'une synthèse, par exemple, requiert une durée réduite de 20 à 40 % en moyenne par rapport à la même synthèse effectuée de manière traditionnelle. Pour s'en convaincre, il suffit de songer à l'allongement du temps et à l'accroissement des difficultés qui résultent de l'opération inverse, lorsque l'on transforme une synthèse test effectuée sur un gramme de réactifs, en une synthèse permettant de préparer plusieurs dizaines de grammes de produit. Ce gain de temps est lié à la fois à la diminution du temps de préparation de l'expérience, du temps de traitement et de purification, et du temps nécessaire pour nettoyer et ranger la verrerie après la manipulation. Ces observations sont également valables en chimie générale, où la mise en œuvre des instruments demande très peu de temps (voir par exemple plus loin, la description de la micro-burette [3,4] ou de la chromatographie flash sur colonne [4,5]).

## B. DISCUSSION

### I. Légitimité du concept

Plusieurs interrogations viennent immédiatement à l'esprit, et toutes ont trait à la pertinence du concept : la microchimie est-elle encore (vraiment) de la chimie ? En d'autres termes, il est indispensable de s'assurer qu'une expérience réalisée sur de petites quantités, outre les avantages qu'elle présente, permet à un élève d'apprendre autant que lors de la même expérience effectuée de manière classique. En effet, on est en droit de se demander si quelque chose n'est pas perdu lors d'une telle miniaturisation de l'expérimentation. En fait, nous pensons résolument que la réponse est non, à condition de pratiquer la microchimie non comme une nouvelle discipline, mais en l'utilisant comme un outil, à bon escient, lorsque son emploi se justifie. Les deux observations suivantes confortent cette idée.

En premier lieu, les techniques d'analyses physico-chimiques modernes permettent désormais de caractériser complètement une substance avec seulement 1 à 50 mg de produit isolé : mesures de la température de fusion ou d'ébullition, spectroscopies infrarouge et UV-visible, mesures de susceptibilités magnétiques, spectroscopies de résonance magnétique nucléaire ou d'absorption atomique sont en effet déjà des microtechniques, et plusieurs d'entre elles sont non destructives. Le tableau 1 indique les quantités de produits nécessaires à la réalisation des méthodes d'analyses les plus courantes.

Technique d'analyse	Quantité de produits nécessaire
Spectroscopie UV-visible	< 10 mg
Spectroscopie infrarouge	< 5 mg
Polarimétrie	1 à 10 mg
RMN du proton	1 à 10 mg
Spectrométrie de masse	< 1 mg
Température de fusion (banc Köfler)	5 mg

**Tableau 1** : quantités de produits nécessaires en fonction de la technique d'analyse employée.

Nul besoin donc, en travaux pratiques, d'exposer chaque binôme à la manipulation périlleuse de 100 mL d'éther diéthylique lors d'une synthèse (magnésienne par exemple) conçue pour obtenir 5 grammes de produit, s'il est possible de la réaliser à partir de quelques dizaines ou centaines de milligrammes de réactifs, et moins de 5 mL d'éther ! On évite ainsi les coûts superflus, les risques liés à l'emploi de substances dangereuses et le problème du traitement des déchets produits, sans qu'aucun des aspects pédagogiques de l'expérience ne soit négligé.

En outre, une observation attentive du matériel permet de constater que toutes les techniques de synthèse, d'extraction, de purification et d'analyse, sont accessibles par la microchimie. Celles-ci s'appliquent aussi bien à la chimie générale (électrolyses [6], densimétrie, ébulliométrie, mesures de constantes thermodynamiques et cinétiques [4]...), qu'à la chimie analytique (dosages, chromatographies ionique, d'exclusion, d'affinité [4]...), ou aux réactions de synthèse (synthèses organiques et organométalliques, élaboration de molécules et de sels inorganiques [4]). C'est indéniablement dans ces derniers domaines qu'elles offrent le plus de possibilités (techniques de chauffage et de reflux [4], techniques de travail sous atmosphère inerte [4], filtrations [4],

extractions [4], techniques d'évaporation [4], distillations [4], recristallisations [4], sublimations...). Quelques exemples de ces multiples possibilités sont développés dans la partie expérimentale ci-dessous.

## II. Les limites des manipulations en petites quantités

Malgré les multiples avantages évoqués plus haut, il convient de rester mesuré, et d'aborder les techniques de la microchimie avec un minimum de réserves. Il est en effet certain que la microchimie ne saurait remplacer totalement l'apprentissage des techniques usuelles, et ce pour deux raisons essentielles.

Bien évidemment, certaines manipulations ne se prêtent pas à une réduction aussi drastique de la taille du matériel et des quantités de réactifs employées, et il faudra continuer à les réaliser à l'échelle usuelle. C'est par exemple le cas de la plupart des synthèses multi-étapes (la microchimie est possible ici, mais il faut partir de quantités de réactifs telle que la quantité de produit obtenue à la fin de la synthèse soit de l'ordre de 200 mg), de la pH-métrie, de la conductimétrie et de la potentiométrie (pour laquelle il n'existe pas pour le moment d'électrode de taille adaptée accessible dans le commerce).

Enfin, la chimie demeure une discipline qui présente des risques, tant au niveau de la santé et de la sécurité de l'expérimentateur qu'au niveau de l'environnement, qu'il s'agisse des effluents des laboratoires ou de ceux de la grande industrie. En faisant disparaître ces périls du laboratoire d'enseignement, l'usage exclusif de la microchimie risquerait de les masquer, voire de les faire oublier. Or, la sensibilisation des élèves à la protection de l'environnement, et l'évolution culturelle dont il a été question plus haut, ne sont possibles que s'ils restent conscients des aléas que présente la pratique de la chimie. A ce titre, l'utilisation de blouses, de gants et de lunettes de protection est plus que jamais de rigueur, même dans un laboratoire d'enseignement dans lequel la microchimie est utilisée.

Des deux constats précédents, il ressort de manière évidente qu'une conversion totale des laboratoires d'enseignement serait une erreur. Par suite, la meilleure solution semble être un mode où une partie seulement des expériences sont conduites à l'échelle "micro", sans perdre de vue le matériel et les techniques plus classiques. Ce mode est de plus tout à fait compatible avec une transformation progressive des installations d'un laboratoire d'enseignement, où le matériel est reconverti et complété graduellement.

## C. PARTIE EXPERIMENTALE

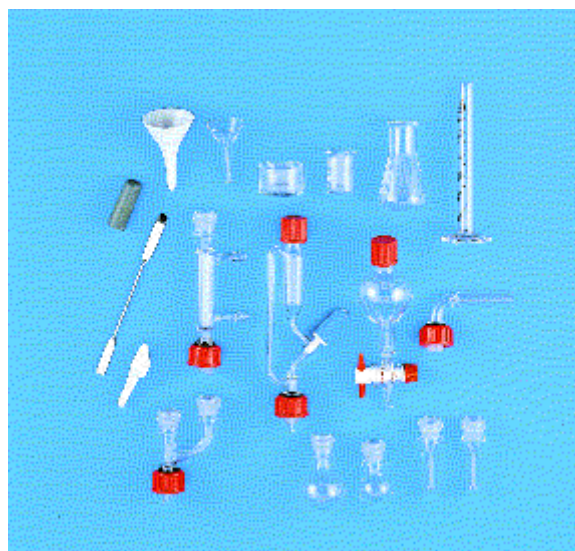
### I. Evolution d'un laboratoire vers la pratique de la microchimie [4,7,8,9]

#### 1. Le matériel et les accessoires

La solution réside essentiellement dans la valorisation du matériel qui se trouve déjà dans le laboratoire d'enseignement. En effet, la microchimie n'est pas un ensemble de techniques fondées sur tel ou tel kit de matériel miniature spécifique. C'est au contraire un "état d'esprit" ; par suite, chacun doit pouvoir pratiquer sa propre microchimie avec le matériel dont il dispose, son ingéniosité, son inventivité et quelques achats bien choisis. Aussi la transformation d'un laboratoire peut-elle être effectuée à moindre coût, et sans en révolutionner l'organisation.

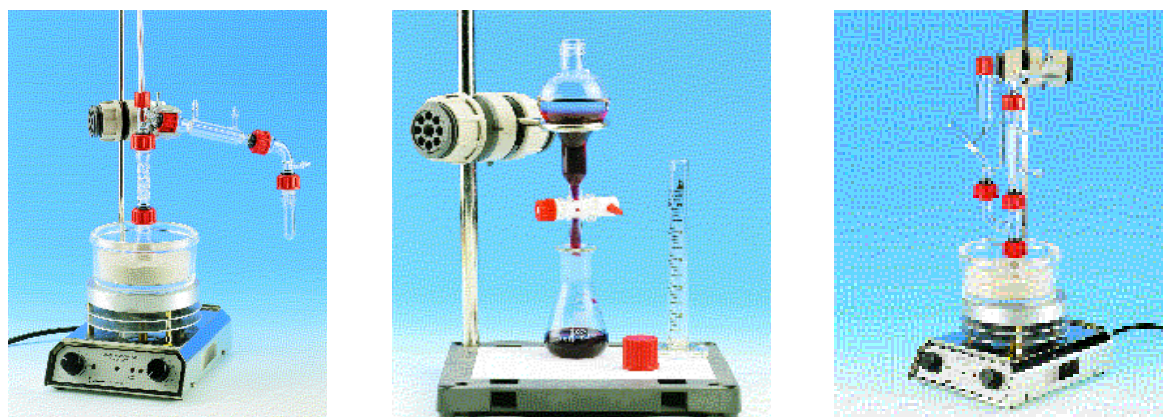
Cependant, en dépit de la valorisation du matériel classique, quelques achats demeurent indispensables lors de la restructuration du laboratoire : petites spatules, pipettes de faible contenance, petits entonnoirs, petites pinces pour attacher la verrerie sont des objets dont il faut prévoir l'achat à moyen terme. L'acquisition de très petits büchners (également nommés entonnoirs de Hirsch) est également nécessaire, car c'est lors de l'étape de filtration des solides que les pertes sont les plus importantes ; ces pertes sont en effet directement liées à la taille du filtre, qui retient inévitablement une partie des cristaux qui s'y incrustent. Enfin, pour les expériences quantitatives et élaborées, un instrument est relativement incontournable et malheureusement onéreux : la balance de précision (à la précision de 1 mg au minimum), pour laquelle il faut prévoir un budget d'au moins 7000 francs. Cependant, son utilisation n'est bien sûr pas réservée spécifiquement à la microchimie, et il s'agit d'un achat d'une très grande utilité. Ces investissements peuvent en outre être effectués progressivement, et l'amortissement du nouveau matériel ne demande que deux ou trois années.

En ce qui concerne les expériences plus élaborées de chimie organique ou organométallique, pour lesquelles le matériel "artisanal" est insuffisant, il existe des kits dans lesquels on trouve les instruments nécessaires à la réalisation de n'importe quel montage. Ces kits bénéficient d'une conception ingénieuse et sont d'une simplicité d'emploi remarquable. Plusieurs modèles existent sur le marché actuellement : un kit américain, distribué par la société *Ace Glass*, fit l'objet d'une description dans un précédent article [7]. Un second, plus récent et mieux adapté à l'enseignement français, est un kit distribué par la société française *Jeulin*. Ce dernier est présenté sur la figure 1.



**Figure 1 :** kit de petit matériel (distribué par la société Jeulin).

La connexion entre les différents éléments de la verrerie est réalisée par un filetage externe sur lequel se visse un capuchon. L'étanchéité est assurée par un joint (figure 2). Ceci évite l'emploi de graisse qui, à cette échelle, nuirait gravement à l'état de pureté des produits, et permet de n'utiliser qu'une seule pince de fixation pour le montage.



**Figure 2 :** montages types de chimie organique : distillation fractionnée, décantation et synthèse sous atmosphère inerte.

## 2. La documentation

Le succès de la microchimie aux Etats-Unis a conduit plusieurs professeurs d'universités à développer une multitude de manipulations dans les divers domaines de la chimie. Ces expériences ont ensuite été publiées régulièrement dans le *Journal of Chemical Education* puis dans des ouvrages édités essentiellement par Wiley. Un résumé de la bibliographie correspondante figure en fin d'article. En outre, nous avons publié dans divers numéros de *l'Actualité Chimique*, plusieurs expériences de synthèses organiques et minérales adaptées à l'enseignement supérieur, qui ne nécessitent que peu de matériel spécifique. De nombreux autres articles ont également déjà été publiés dans le *Bulletin de l'Union des Physiciens*. Enfin, un premier ouvrage en français est paru chez *De Boeck Université* cette année [4] ; il détaille les différentes techniques rencontrées en microchimie (certaines classiques, d'autres plus particulières), et présente une série de manipulations de tous niveaux dans différents domaines de la chimie.

Il est également possible et facile de convertir la plupart des manipulations des recueils classiques d'expériences. En général, il suffit de diviser les quantités citées dans la littérature par dix à cent, afin de travailler sur une quantité de réactifs comprise entre 50 et 500 mg. A cette échelle, il est très important d'apporter un soin particulier à la manipulation lors du premier essai. Il faut, de plus, toujours veiller à ce que la quantité de

produit obtenu suffise pour les analyses nécessaires à l'identification du composé. Pour cela, il faut tenir compte du rendement de la réaction, calculer la quantité de produit attendue, identifier la technique de purification et la méthode d'analyse.

## II. Exemples et techniques particulières

### 1. Illustration préliminaire

Dans l'exemple ci-dessous, nous avons choisi d'illustrer le changement d'échelle sur la synthèse d'un organomagnésien. Le tableau 2 présente les quantités de réactifs nécessaires selon l'échelle à laquelle on réalise cette réaction.

Produits	Quantités « macro »	Quantités « micro »
Éther diéthylique	100 mL	2 à 7 mL
Bromobenzène	5 mL	100 à 500 µL
Magnésium sec	1,2 g	25 à 100 mg
1,2-Dibromoéthane	--	1 goutte

**Tableau 2 :** Quantités de réactifs nécessaires selon l'échelle à laquelle on réalise la synthèse magnésienne.  
Remarque : à l'échelle « micro », il est nécessaire d'employer une goutte de 1,2-dibromoéthane, afin d'activer le magnésium.

Le passage d'une quantité « macro » à une quantité « micro » permet de réaliser la synthèse magnésienne en toute sécurité grâce à la faible quantité d'éther diéthylique employée : 10 postes nécessitent 20 à 70 mL d'éther en version microchimie par rapport à 1 L en version « macro » !

### 2. Diverses utilisations de la pipette Pasteur

En chimie générale, inorganique, organique et organométallique, l'instrument de base est la pipette Pasteur dont la contenance correspond approximativement aux volumes de solvants utilisés en micro-synthèse. On s'en sert pour filtrer des solutions en plaçant un minuscule morceau de coton à son extrémité ; elle peut encore remplir l'office d'une micro-colonne à chromatographie [4,5], ou permettre d'effectuer des extractions de façon très simple et très efficace.

La nature du matériau qui la constitue, le verre (et non le Pyrex), permet surtout de la transformer en une multitude d'objets très utiles, à l'aide d'un petit brûleur à gaz vendu dans le commerce. Citons par exemple la réalisation de micro-barreaux aimantés en un temps record, en scellant l'extrémité la plus fine de la pipette, en y plaçant un segment de trombone d'un demi centimètre de long, et en scellant puis détachant la portion de verre entourant le métal [4]. Il est bien sûr possible d'utiliser des petits barreaux en Téflon dits "grains de riz", mais leur prix de revient unitaire dépasse 10 francs, et beaucoup finissent leur vie dans les siphons des éviers...

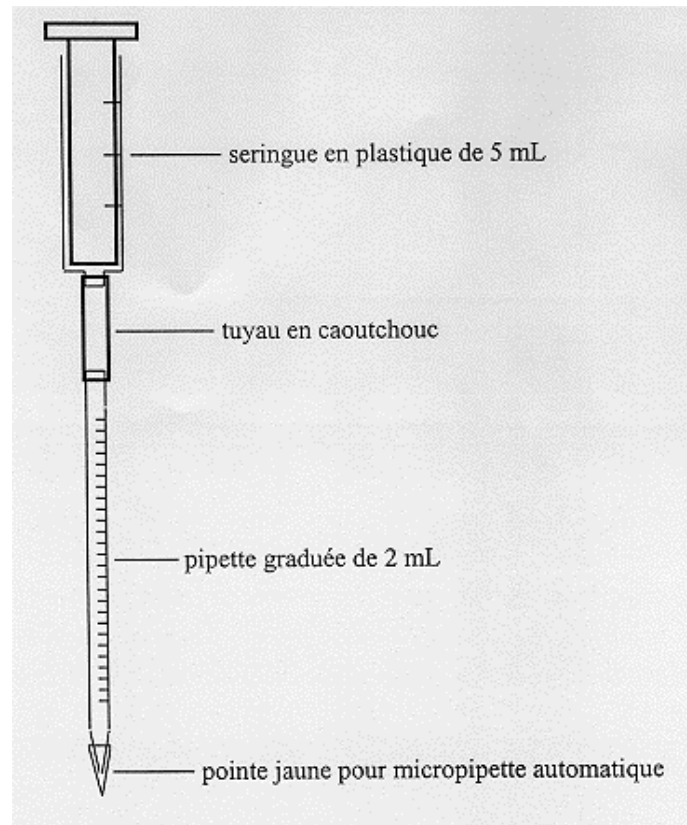
Les recristallisations de très petites quantités ne permettent pas l'utilisation de büchners. Elles s'effectuent en fait dans de petits tubes à centrifugation ou des fioles coniques, et les étapes de filtration/rinçage sont remplacées par l'aspiration du liquide surnageant à l'aide d'une pipette Pasteur, à l'extrémité de laquelle on a au préalable introduit un minuscule morceau de coton. Lorsque les cristaux obtenus sont trop fins et risquent de boucher la pipette, il est possible d'introduire un morceau de coton propre directement dans la solution, et d'aspirer le liquide au travers de ce filtre improvisé, en y appuyant l'extrémité de la pipette.

### 3. Petits récipients, prélèvement des réactifs

La valorisation du matériel courant passe également par l'utilisation de tous les petits récipients que l'on peut trouver dans son laboratoire (tubes à essais, erlenmeyers et bechers de 5 à 25 mL), et qui jusqu'à présent n'avaient présenté que peu d'intérêt. Le prélèvement des réactifs est réalisé à l'aide d'éprouvettes graduées de 10 à 25 mL et de pipettes Pasteur. Pour prélever des quantités précises, on utilisera plutôt des pipettes graduées de 0,5 à 2 mL, ainsi que des seringues en plastique ou en verre de contenances comprises entre 1 et 5 mL, très pratiques pour prélever de petites quantités de réactifs. Ces dernières peuvent également être utilisées pour des prélèvements ou des additions aux milieux réactionnels dans des conditions spécifiques (réactions en milieu anhydre ou sous atmosphère inerte). Il faut alors les munir d'une aiguille. Des fioles jaugées de 5 ou 10 mL permettent de réaliser des solutions de concentrations précises, et sont particulièrement adaptées aux analyses quantitatives en spectroscopie UV-visible, car elles permettent d'éviter le gaspillage des produits synthétisés

#### 4. Les dosages

De même en chimie analytique, petits récipients et pipettes de 1 à 5 mL permettent de réaliser n'importe quel dosage utilisant un indicateur de fin de réaction. La réalisation la plus spectaculaire en la matière est sans doute la confection des micro-burettes (figure 3) [3,4] : dans un premier temps, un corps de seringue de 5 mL est connecté à l'extrémité supérieure d'une pipette graduée de 2 mL de précision, par l'intermédiaire d'un court tube de caoutchouc flexible.



**Figure 3** : micro-burette.

Ce dispositif permet d'effectuer les opérations de rinçage et de remplissage très rapidement. Il permet également de la vider lentement et de façon contrôlée lors du dosage, par simple pression sur le piston de la seringue, pour peu que l'on ait fixé, à l'extrémité inférieure de la pipette graduée, un embout en matière plastique de très faible section, du type de ceux qu'utilisent en général les biologistes à l'extrémité de leurs pipettes automatiques. Cela permet de diminuer la taille des gouttes et de mieux contrôler le débit de la pipette. L'ensemble est bien sûr fixé sur un support à l'aide d'une pince, comme une burette traditionnelle. L'instrument ainsi constitué apporte à la technique du dosage un intérêt extraordinaire en termes de commodité, de rapidité et de sécurité. En outre, la faible section de cette micro-burette, ainsi que le contrôle minutieux (grâce au corps de seringue et à l'embout plastique) de la taille et du nombre des gouttes qu'elle délivre, permet d'atteindre la même précision qu'une burette classique.

#### 5. Dispositifs de chauffage

L'innovation la plus spectaculaire est sans doute l'abandon définitif des bains d'eau peu commodes (température de chauffage inférieure à 100 °C, vapeur d'eau autour du montage), des chauffe-ballons, et des bains d'huile de silicone dangereux et glissants. Ces techniques de chauffage délicates sont remplacées avantageusement par des bains de sable de très petite taille. Cette dernière caractéristique permet d'en assurer un chauffage rapide et homogène sans agitation, par l'emploi de simples plaques chauffantes. L'apport au niveau de la sécurité est également considérable car, dans la mesure où le sable possède une faible chaleur massique et se présente sous forme de grains solides qui n'adhèrent pas à la peau, il est presque impossible de se brûler en cas de mauvaise manœuvre, contrairement à ce qui se produit avec les bains d'eau et d'huile.



### III. Quelques expériences développées pour les enseignements secondaire et supérieur

- **Exemple d'analyse physico-chimique : détermination d'une température d'ébullition [4]**

Microchimie : techniques et expériences ; De Boeck Université, 1999

*Réalisation d'un micro-barreau magnétique*

*Réalisation du dispositif d'analyse*

*Application : détermination de la température d'ébullition de l'isopropanol.*

Mots-clefs : micro-barreau magnétique, détermination d'une température d'ébullition, reproductibilité, facilité de mise en œuvre.

Commentaire : Cette expérience ne nécessite qu'une pipette Pasteur, un petit brûleur à gaz, une petite lime, un trombone, un becher de 25 mL rempli d'huile, un thermomètre et un agitateur magnétique chauffant. Elle permet d'obtenir en quelques minutes la température d'ébullition de n'importe quel liquide, pour peu qu'elle soit comprise entre 40 et 200°C, avec une précision de 1 à 2°C. Le micro-barreau magnétique est fabriqué en 2 minutes, et peut servir à l'agitation lors de la réalisation de n'importe quelle synthèse.

- **Exemple de technique de dosage : dosage colorimétrique [4]**

Microchimie : techniques et expériences ; De Boeck Université, 1999

*Réalisation d'une micro-burette*

*Applications : dosage élémentaire de l'acide acétique par une solution d'hydroxyde de sodium.*

Mots-clefs : micro-burette, dosages, précision, rapidité.

Commentaire : L'originalité du dosage réside dans le fait qu'une deuxième micro-burette, contenant de l'acide chlorhydrique de même concentration que la soude, est placée en parallèle à côté de la première. Ce dispositif, qui serait lourd, encombrant et onéreux en version traditionnelle puisqu'il faudrait au moins deux burettes par binôme, est mis en place en quelques minutes. En effet, le rinçage et le remplissage des micro-burettes, aussi bien que leur élaboration, s'effectuent très rapidement et avec une grande simplicité. La deuxième micro-burette permet, juste après avoir dépassé le point d'équivalence, de ré-acidifier la solution pour repasser à un pH inférieur au pH de l'équivalence, avant d'ajouter une nouvelle fois de la soude. En répétant l'opération plusieurs fois et en notant les volumes respectifs versés, on obtient avec une grande précision les limites de la zone de virage. La micro-burette devient extrêmement efficace dans les dosages colorimétriques dont la zone de virage n'est pas nette, comme c'est souvent le cas dans les dosages à l'EDTA par exemple. C'est également l'outil idéal pour réaliser un dosage secondaire lors d'une manipulation élaborée. Comme nous l'avons signalé plus haut, on peut montrer que la précision des dosages ainsi réalisés est du même ordre de grandeur qu'en version traditionnelle.

- **Exemple de technique de purification : extraction d'un pigment terpénique du paprika [5]**

Article paru dans le numéro de décembre 1997 du *Bulletin de l'Union des Physiciens*

*Extraction*

*Séparation par micro-chromatographie sur colonne*

*Analyse par spectrophotométrie UV-visible*

Mots-clefs : micro-colonne de chromatographie, séparation flash, spectrophotométrie UV-visible, démonstrativité, rapidité.

Commentaire : Cette expérience permet de réaliser en 30 minutes n'importe quelle chromatographie flash sur silice, sur des quantités variant du milligramme à la dizaine de milligrammes (pigments colorés, fullérènes (à paraître)...), lorsque la séparation des différents produits n'est pas trop délicate. Si la colonne est remplie avec des résines échangeurs d'ions ou des gels de

type *Séphadex*, des chromatographies d'exclusion ou par échange d'ions peuvent être réalisées facilement.

- **Exemple de synthèse organique multi-étape [10]**

Article paru dans le numéro d'avril 1998 de *l'Actualité Chimique*,  
expérience extraites des 29<sup>èmes</sup> Olympiades Internationales de Chimie (Montréal, juillet 1997)

*Synthèse de la 1,3-dihydrobenzoxazine en trois étapes*  
*Caractérisation*

Mots-clefs : synthèse multi-étape, produit biologiquement actif, Olympiades internationales de chimie, température ambiante, filtrations sous pression réduite, recristallisation, spectrophotométrie UV-visible, rapidité.

Commentaire : Cette manipulation permet d'introduire simplement auprès des étudiants la notion de « stratégie de synthèse », et de l'illustrer par la synthèse en trois étapes d'un composé possédant de multiples activités biologiques (fongistatique, bactériostatique, tuberculostatique). Les avantages de cette manipulation résident dans sa facilité et sa rapidité de mise en œuvre ; en effet, la totalité des expériences peut être réalisée en moins de trois heures. Les caractérisations sont en outre multiples et aisées. La stratégie concernant la cyclisation repose sur une réaction de Mannich intramoléculaire. L'amine nécessaire est formée par la réduction de l'imine correspondante, elle-même obtenue à partir du 1-amino-4-méthylbenzène et de l'hydroxybenzaldéhyde.

- **Exemple de synthèse organique : réaction de Wittig**

Article paru dans le Cahier Enseignement Supérieur (mai 1999) du *Bulletin de l'Union des Physiciens*

*Synthèse*  
*Purification*  
*Caractérisation*

Mots-clefs : réaction de Wittig, milieu biphasique, régiosélectivité, conditions douces, extraction, recristallisation, spectrophotométries infrarouge et UV-visible, faibles coûts.

Commentaire : La réaction de Wittig est une réaction essentielle de la chimie moderne, et son étude a été récemment introduite au programme des classes préparatoires. Pourtant, elle est délicate à réaliser en séance de travaux pratiques, notamment à cause de son coût et des risques qu'elle implique la manipulation des réactifs généralement nécessaires. L'exemple cité permet au contraire d'éluder ces problèmes, grâce à l'emploi de conditions relativement douces. En effet, aucune des conditions usuelles (solvant anhydre, atmosphère inerte, utilisation de bases organolithiées ou d'amidures, etc.) n'est nécessaire. Le milieu réactionnel est biphasique : l'aldéhyde se trouve dans la phase organique, et la base employée est la potasse en solution aqueuse ; le sel de phosphonium joue le rôle d'agent de transfert de phase. Dans ces conditions, ainsi que grâce à l'emploi de petites quantités de réactifs et d'une verrerie très classique, la réaction est facile à mettre en œuvre, très rapide (30 minutes d'agitation à température ambiante), et très peu coûteuse (6 francs par poste).

- **Exemple de synthèse organique : bromation stéréospécifique d'une liaison éthylénique**

Article à paraître dans le *Bulletin de l'Union des Physiciens* (fin 1999)

*Synthèse*  
*Caractérisation*

Mots-clefs : bromation de liaison éthylénique, stéréospécificité, reflux, filtration sous pression réduite, sécurité, faibles coûts.

Commentaire : Les réactions d'addition de dibrome sur la liaison éthylénique sont elles aussi développées extensivement dans tous les programmes de chimie de l'enseignement supérieur. Pourtant, la réalisation d'expériences illustrant ces réactions est rendue aléatoire par la nécessité d'employer soit le dibrome pur, composé extrêmement dangereux, soit certains de ses dérivés plus doux, mais qui présentent alors un coût trop élevé pour pouvoir être employés en séances de travaux pratiques. La microchimie conjuguée à l'emploi de l'un de ces réactifs, le perbromure de pyridinium, résout à la fois le problème du coût et des risques encourus. Dans des conditions extrêmement sûres et pour un prix de revient par poste de 2 francs seulement, cette expérience permet de réaliser l'addition anti d'une molécule de dibrome sur la liaison éthylénique du trans-stilbène. La miniaturisation de la manipulation confère en outre deux avantages supplémentaires à l'expérience : une grande rapidité d'exécution (15 minutes de chauffage + 15 minutes de traitement), et une facilité de mise en œuvre accrue si l'on possède des ballons de 10 ou 25 mL et des réfrigérants s'y adaptant. La seule étape de purification est une filtration sous pression réduite.

- **Exemple de synthèse en chimie de coordination : chimie de coordination du rhodium [11]**

Article paru dans le numéro d'avril 1999 de *l'Actualité Chimique*

*Synthèse de l'adduit du trans-chlorocarbonylbis(triphénylphosphine)rhodium(I) avec SO<sub>2</sub>*  
*Analyse par spectrophotométrie IR*

Mots-clefs : chimie de coordination moderne, rhodium, réactifs dangereux, filtration sous pression réduite, spectrophotométrie infrarouge, haute sécurité, faibles coûts.

Commentaire : Nous avons vu qu'en réduisant les risques et les coûts des manipulations, la microchimie permet également, à niveaux de coût et de risque équivalents à ceux des synthèses traditionnelles, d'exploiter divers aspects de la chimie moderne, inaccessibles jusqu'alors. L'expérience proposée ici en constitue la preuve. Le rhodium est un composé extrêmement onéreux (environ 1000 francs le gramme) ; cependant, l'emploi de quantités minuscules (de l'ordre de la dizaine de milligrammes) en rend l'utilisation possible par plusieurs groupes d'étudiants. Le réactif de départ de la synthèse évoquée ci-dessus peut être préparé très facilement et très rapidement dans une première étape ; celle-ci donne lieu à un dégagement de monoxyde de carbone, mais en quantité négligeable. L'étape suivante consiste à produire *in situ* du dioxyde de soufre que l'on liquéfie immédiatement par une méthode originale ; le liquide tombe alors sur le complexe du rhodium et l'adduit se forme. Une variante mentionnée dans l'article cité consiste à ajouter au réactif rhodié 1 mL d'une solution de dichlore dans le tétrachlorure de carbone. Tous les composés synthétisés peuvent être caractérisés par spectrophotométrie infrarouge, par études et comparaisons de la bande d'absorption du groupement carbonyle. La cinétique de décomposition de l'adduit, redonnant les produits de départ, peut être suivie par la même technique. Ces manipulations, inenvisageables à l'échelle du gramme, sont extrêmement simples et sûres dans ces conditions, tout en demeurant peu onéreuses. Elles permettent en outre d'approcher la chimie de coordination des métaux précieux, dont l'importance est cruciale en catalyse organométallique.

- **Exemple de synthèse organométallique : addition d'un organocuprate sur une énone [12]**

Article paru dans le numéro de février 1998 de *l'Actualité Chimique*

*Synthèse du cuprate in situ*  
*Addition sur l'énone*  
*Caractérisation par CCM, spectrophotométrie IR, RMN et par CPG*

Mots-clefs : organocuprate, atmosphère inerte, addition conjuguée régiosélectivité, extraction, distillation, spectrophotométries infrarouge et de résonance magnétique nucléaire, chromatographie en phase vapeur.

Commentaire : Parmi les notions fondamentales qui figurent dans tous les cours de chimie organique de l'enseignement supérieur, la chimie organométallique reste une discipline incontournable.

Elle permet en effet la mise en œuvre de synthèses très sélectives. Il est donc important de pouvoir l'illustrer expérimentalement. Cependant, les précautions que nécessitent l'usage des réactifs organométalliques rendent les manipulations souvent délicates. La microchimie permet justement de remédier à cet inconvénient par l'emploi de micro-quantités de composés souvent très réactifs et parfois toxiques, ce qui minimise les risques encourus lors de leur utilisation. L'organocuprate employé ici est engendré *in situ* par une réaction de trans-métallation, à partir de méthyllithium et d'iodure de cuivre (I). A 0°C et sous atmosphère de diazote, le diméthylcuprate de lithium s'additionne régiosélectivement en position 1,4 sur les énonés, ici la cyclohexénone. La cétone finale, après extraction et évaporation du solvant, est obtenue sous forme d'une huile dont l'analyse IR indique que seule l'addition 1-4 s'est produite. Les caractérisations sont multiples. L'intérêt principal de l'emploi de la microchimie dans cette synthèse réside dans le fait que grâce à la manipulation de petites quantités, le traitement est beaucoup plus facile et plus rapide à réaliser qu'en mode « macro ».

- **Exemple de synthèse organométallique : synthèse magnésienne [13]**

Article paru dans le numéro de mars 1998 du *Bulletin de l'Union des Physiciens*

*Synthèse de l'organomagnésien*

*Dosage*

Mots-clefs : synthèse magnésienne, atmosphère inerte, reflux, dosage du magnésien, haute sécurité, rapidité.

Commentaire : Les organomagnésiens, bien qu'appartenant à la chimie du début du siècle, constituent une classe de composés extrêmement importants dans l'enseignement de la chimie, en vertu de leurs propriétés nucléophiles qui permettent la création de liaisons carbone-carbone ; ces réactions sont importantes car les organomagnésiens sont obtenus à partir de dérivés halogénés, qui subissent ainsi une inversion de polarité (« Umpolung »). Le problème principal de la mise en œuvre de ces réactions dans les conditions usuelles réside dans l'emploi de grandes quantités d'éther diéthylique, qui rendent les manipulations dangereuses. La microchimie permet d'éviter cette difficulté en réduisant de manière drastique les quantités de solvants nécessaires pour la réaction et son traitement. De plus, à cette échelle, la synthèse magnésienne est facile à mettre en œuvre et à contrôler. Le temps de manipulation est également réduit : en quinze minutes, la réaction est achevée, et quinze autres suffisent pour réaliser le dosage du réactif synthétisé. Ce dernier peut également être additionné sur n'importe quel électrophile habituel, en adaptant les synthèses correspondantes à la quantité de magnésien obtenu.

## Conclusion

Qu'on la considère sous l'angle de la pédagogie, de la sécurité, de la protection de l'environnement, ou sous un angle économique, la microchimie semble être en parfaite adéquation avec les exigences de l'enseignement actuel de la chimie expérimentale. Plus qu'une nouvelle façon de manipuler, sa pratique relève d'une nouvelle façon de considérer la chimie dans son ensemble : « reproduire exhaustivement les avancées de la chimie moderne, de la manière la plus simple et la plus sûre possible, dans une attitude de respect de la nature », telle est la façon dont nous concevons grâce à elle l'enseignement pratique de la chimie.

La conversion d'un laboratoire classique en laboratoire « semi-micro » nécessite toutefois un investissement initial qui peut sembler important, et que nombre de lycées ne semblent pas être en mesure de pouvoir fournir, malgré l'assurance d'un amortissement rapide, puis d'économies certaines après quelques années. Mais nous avons montré qu'avec un peu d'ingéniosité et grâce à la valorisation du matériel classique, il était possible de réaliser la plupart des expériences du niveau secondaire sans autre matériel spécifique qu'une balance de précision. En ce qui concerne l'enseignement supérieur, le problème financier semble moins crucial, ce qui permet, aux enseignants des classes de BTS, des IUT, des classes préparatoires aux grandes écoles, de l'université et des écoles d'ingénieurs, d'aborder l'ensemble des techniques sous l'approche « micro », et de bénéficier de tous les avantages que nous avons exposés.

Il est intéressant de noter à quel point l'usage du petit matériel a su conquérir, jusqu'aux plus incrédules, dans tous les lieux où il a été expérimenté. Parfois considérée comme une « nouvelle mode », et malgré quelques

limites indéniables, la microchimie ne peut laisser indifférent. Les réserves tombent une à une devant quelques démonstrations, et l'enthousiasme que suscite la simplicité des manipulations à petite échelle succède en général rapidement au scepticisme. Dès lors, l'introduction de la microchimie dans l'enseignement français devrait tendre à s'imposer progressivement, car il correspond à un réel besoin, en parfait accord avec les nouvelles orientations prises récemment par les programmes des enseignements secondaire et supérieur.

## Références

- [1] a) Martin N.H., Waldman F.S. The three R's of resource management in the undergraduate organic chemistry laboratory. *J. Chem. Ed.*, vol. 71, nov. 1994, 11, p.970-971. b) Szafran Z., Singh M.M., Pike R.M. The microscale inorganic laboratory safety, economy and versatility. *J. Chem. Ed.*, vol. 66, nov. 1989, 11, p.A263-A267. c) Perlmutter H.D., Kapichak R.K. A multiscale approach to organic chemistry laboratory, introduction of kilo-scale experiments. *J. Chem. Ed.*, vol. 69, juin 1992, 6, p.507-508. d) Silberman R.G. Running a microscale organic chemistry lab with limited resources. *J. Chem. Ed.*, vol. 71, juin 1994, 6, p.A140-A141.
- [2] Alazard J.P., Picot A. Que deviennent les déchets chimiques de laboratoire ? *L'Actualité Chimique*, juin 1997, 6, p.20-30.
- [3] Singh M.M., Szafran Z., Pike R.M. Construction and use of an inexpensive microburet. *J. Chem. Ed.*, vol. 68, mai 1991, 5, p.A125.
- [4] N. Cheymol, M. Hoff, *Microchimie : techniques et expériences ; De Boeck Université, 1999*
- [5] Cheymol N., Hoff M. Expérience en version microchimie : extraction d'un produit naturel. *Bull. Un. Phys.*, déc. 1997, 799, p.2111-2116.
- [6] Singh M.M., Szafran Z., Pike R.M., Davis J.D., Leone S.A. Microscale electrolysis : synthesis of iodoform, its characterisation, Faraday's laws, and Avogadro's number. *J. Chem. Ed.*, vol. 72, janv. 1995, 7, p.A4-A6.
- [7] Cheymol N., Eastes R.-E., Hoff M. La " microchimie " : une nouvelle façon de penser dans l'enseignement de la chimie expérimentale. *L'Actualité Chimique*, février 1998, 2, p.10-17.
- [8] a) Zipp A.P. Introduction to " the microscale laboratory ". *J. Chem. Edu.*, vol. 66, nov. 1989, 11, p.956-957. b) Wood C.G. *Microchemistry*. *J. Chem. Ed.*, vol. 67, juillet 1990, 7, p.596-597. c) Zubrick J.W. *The organic chem lab survival manuel, a student's guide to techniques*, 3<sup>rd</sup> éd. John Wiley, New York, 1992.
- [9] *Micro/mini-lab, kits and components*. Ace Glass catalog. Kit de microchimie enseignement supérieur, catalogue Jeulin 1999.
- [10] Cheymol N., Eastes R.-E., Hoff M. Un exemple de synthèse multiétape en version semi-micro aux Olympiades internationales de chimie. *L'Actualité Chimique*, avril 1998, 4, p.31 à 34.
- [11] Cheymol N., Eastes R. -E., Hoff M. La microchimie : une voie d'accès à la chimie des métaux précieux dans l'enseignement supérieur. *L'actualité chimique*, avril 1999, à paraître.
- [12] Cheymol N., Eastes R.-E., Hoff M. Expérience en version " microchimie ". Addition d'un organocuprate sur une ènone. *L'Actualité Chimique*, février 1998, 2, p.18-21
- [13] Cheymol N., Hoff M.. Synthèse et dosage d'un organomagnésien mixte : utilisation des techniques de la microchimie. . *Bull. Un. Phys.*, mars 1998, p.473.

## Bibliographie disponible

- Szafran Z., Pike R.M., Foster J.C., *Microscale General Chemistry Laboratory's with Selected Macroscale Experiments*. Wiley, New York, 1991.
- Singh M.M., Pike R.M., Szafran Z. *Microscale Experiments for General and Advanced General Chemistry*. Wiley, New York, 1994.
- Singh M.M., Szafran Z., Pike R.M. *Microscale and Selected Macroscale Experiments for General Advanced General Chemistry, an Innovative Approach*. Wiley, New York, 1995.
- Szafran Z., Pike R.M., Singh M.M. *Microscale Inorganic Chemistry : a Comprehensive Laboratory Experience*. Wiley, New York, 1991.
- Mayo D.W., Pike R.M., Trumper P.K. *Microscale Organic Chemistry*, 3rd Edition. Wiley, New York, 1994.
- Mayo D.W., Pike R.M., Trumper P.K. *Microscale Organic Laboratory with Multistep and Multiscale Syntheses*, 3rd Edition. Wiley, 1994.
- Wilcox C.F. & M.F. *Experimental Organic Chemistry : Small Scale Approach*, 2nd Edition. Prentice Hall, 1994.

- Pavia D.L., Lampman G.L., Kriz G.S., Engel R.G. Introduction to Organic Laboratory Techniques : a Microscale Approach, 2nd Edition. Saunders College Publishing, 1995.
- N. Cheymol, M. Hoff, Microchimie : techniques et expériences ; De Boeck Université, 1999

## **Remerciements**

Les auteurs tiennent à remercier la direction du Département de chimie de l'Ecole normale supérieure pour avoir favorisé le développement de la microchimie, ainsi que les enseignants et techniciens de chimie du lycée Louis Le Grand pour leur aide lors de la réalisation de quelques unes des expériences citées. Remerciements également à tous ceux qui nous ont fait confiance et ont favorisé notre projet, en nous invitant à en parler devant diverses assemblées.