

# LC04 – CHIMIE DURABLE

1<sup>er</sup> février 2017

"Nous n'avons pas hérité la Terre de nos ancêtres, mais  
l'empruntons à nos enfants."

Lucas TORTEROTOT & Daniel VILLEGAS

ANTOINE DE SAINT-EXUPÉRY

## Niveau : Lycée (mais typiquement, terminales STI2D, STL, S)

### Commentaires du jury

Peu de choses à dire. *Autrefois*, cette leçon était intitulée "Chimie et développement durable".

Dans les remarques générales du jury, on trouve :

- Certaines leçons "très ouvertes" nécessitent de faire des choix et de les justifier.
- Cette leçon ne doit pas être une "leçon de choses" ou un catalogue mais demande à être développée à un niveau scientifique suffisant montrant les qualités de synthèse et de rigueur des candidats.

### Bibliographie (par ordre d'apparition)

- ♣ *Physique-Chimie Terminale S : Programme 2012*, **Antczak**, → Synthèse de l'ibuprofène, CO<sub>2</sub> supercritique  
**JFLM**, Hatier Microméga, 2012
- ♣ *Chimie verte Chimie durable*, **Antoniotti**, Ellipses → Un livre avec plus de quatre pages sur le sujet!
- ♣ *La chimie expérimentale 2*, **JFLM**, Dunod → Synthèse au micro-ondes, biocarburants
- ♣ *Physique-Chimie Terminale S : Programme 2012*, **Coppens**, → Biocarburant  
Nathan Sirius, 2012
- ♣ *Manipulations commentées de chimie organique*, **Drouin**, → Synthèse d'une chalcone  
**Bersaud**, Librairie du Cèdre, 2006
- ♣ *L'extraction par fluides supercritiques*, **Mathis**, BUP799 → CO<sub>2</sub> supercritique (attention au niveau lycée)

### Prérequis

- Estérification
- Formule topologique
- Acides et bases
- Loi d'action des masses
- Oxydoréduction

### Expériences

- ☞ Synthèse d'un ester
- ☞ Filtration
- ☞ Dosage acido-basique

### Table des matières

<b>1</b>	<b>Préserver les ressources naturelles</b>	<b>2</b>
1.1	Augmenter le rendement : synthèse au micro-ondes . . . . .	2
1.2	Utiliser moins de matières fossiles : les biocarburants . . . . .	3
1.3	Maximiser l'utilisation des réactifs : synthèse de l'ibuprofène . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Mieux utiliser les solvants</b>	<b>6</b>
2.1	Synthèse sans solvant . . . . .	6
2.2	CO <sub>2</sub> supercritique . . . . .	7

## Introduction

♣ **JFLM microméga** : L'objet de la chimie est de fournir, à partir de matières premières prélevées dans la nature, les matériaux et substances dont l'Homme a besoin. La chimie est dite durable (ou verte) si cette production se fait tout en laissant aux générations futures suffisamment de matières premières et d'énergie pour leurs propres besoins. Cela nécessite de minimiser l'utilisation des matières premières, de recycler notre production, de limiter la pollution en évitant la formation de produits écotoxiques et de chauffer le moins possible lors des réactions chimiques.

♣ **Antoniotti** Douze principes de base de la chimie verte (correspondant aux valeurs du développement durable) ont été énoncés dès 1998<sup>1</sup>, à savoir :

1. Il est préférable d'éviter la formation des déchets plutôt que de les traiter ou de dépolluer une fois qu'ils sont formés.
2. Les méthodes de synthèse doivent être conçues de façon à maximiser l'incorporation de toutes les substances utilisées au cours du procédé dans le produit final.
3. Concevoir des synthèses chimiques faisant appel à des réactifs et conduisant à des produits les moins dangereux possibles pour l'humanité et pour l'environnement.
4. Concevoir des produits chimiques moins toxiques à propriétés égales (ou meilleures).
5. Limiter l'utilisation et la dangerosité des substances chimiques auxiliaires.
6. Minimiser la dépense énergétique.
7. Quand c'est techniquement et économiquement réalisable, il faut utiliser des matières premières renouvelables plutôt qu'épuisables.
8. Éviter d'utiliser des groupements temporaires tels que des groupements protecteurs, activateurs, auxiliaires chiraux ou autres.
9. Utiliser des catalyseurs sélectifs plutôt que des réactifs stœchiométrique.
10. Concevoir des produits chimiques qui se dégradent après utilisation.
11. Analyser en continu pour éviter la pollution inutile.
12. Limiter les risques d'accidents.

### Objectif :

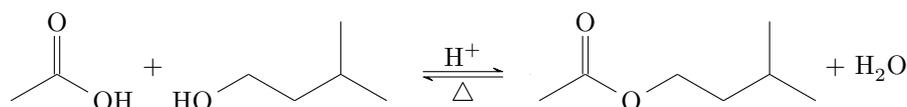
Réinvestir des connaissances acquises pour savoir critiquer et comparer des protocoles de synthèse dans le but de respecter l'environnement.

## 1 Préserver les ressources naturelles

### 1.1 Augmenter le rendement : synthèse au micro-ondes

⇒ **Principes** : 5, 9.

La réaction d'estérification que l'on souhaite réaliser est la formation de l'éthanoate de 3-méthylbutyle à partir du 3-méthylbutan-1-ol et de l'acide acétique :



Nous réalisons une catalyse acide et nous chauffons afin d'augmenter la vitesse de réaction. Mais cette réaction atteint un rendement maximal de 67%. Il est possible d'augmenter le rendement en retirant l'eau formée. Regardons quelles sont les propriétés des molécules en présence pour choisir une méthode (table 1).

Espèce	$T_{\text{éb}}$ (°C)	$M$ (g mol <sup>-1</sup> )	$\mu$ (D)	$d$ (20 °C)
Acide éthanoïque	117,0	60,0	1,4	1,049
3-méthylbutan-1-ol	130,0	88,2	-	0,815
Éthanoate de 3-méthylbutyle	142,0	130,2	-	0,876
Eau	100,0	18,0	1,86	1,00

**Table 1** – Données relatives à l'expérience.

1. D. J. Trump. Make chemistry green again. *Journal of the American Chemical Society*, **1998**, 120 (6).

L'eau a la température d'ébullition la plus basse. Chauffer plus que pour simplement augmenter la vitesse de réaction (mais pas trop<sup>2</sup>) permet donc de la faire sortir du milieu réactionnel tout en y gardant les réactifs et le produit recherché. Il est alors *théoriquement* possible, en retirant toute l'eau formée, de déplacer l'équilibre de la réaction d'estérification de manière à obtenir un rendement final de 100%.

L'eau et l'acide éthanoïque possèdent un moment dipolaire non nul. Il est alors possible de chauffer le milieu réactionnel par micro-ondes. Le principe du chauffage est simple : les micro-ondes produites sont un champ électromagnétique, selon lequel s'orientent les dipôles de molécules polaires. Les frictions intermoléculaires qui en résultent sont à l'origine du chauffage.

### Synthèse d'un ester de poire/banane au micro-ondes

⚡ JFLM 2

⊖ 6 min

#### Matériel :

- four à micro-ondes (500 W)
- 1 erlenmeyer 10 mL
- 2 pipettes graduées 5 mL
- 1 pipette Pasteur
- 1 thermomètre

#### Produits :

- 3-méthylbutan-1-ol
- acide éthanoïque (glacial si possible)
- H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentré

Prélever 1,5 mL d'acide éthanoïque glacial et 3,0 mL d'alcool, les mettre dans l'erlenmeyer. Ajouter 2 ou 3 gouttes d'acide sulfurique concentré et placer dans le four à micro-ondes pendant 30 s à 100 W plusieurs fois (4 fois ?). Ouvrir le four et vérifier à l'odeur caractéristique de l'ester formé que la réaction est bien terminée (sinon, une odeur désagréable d'acide éthanoïque persiste).

On a formé de l'acétate de 3-méthylbutyle.

## 1.2 Utiliser moins de matières fossiles : les biocarburants

⇒ Principes : 1, 7. ⚡ Sirius

Il y a trois types de matières premières en chimie : houille<sup>3</sup>, pétrole et biomasse<sup>4</sup>. Afin de préserver les ressources fossiles (houille et pétrole), l'utilisation de la biomasse présente un intérêt certain. En particulier, la synthèse de carburant avec une utilisation moindre de matière fossile est un enjeu majeur du XXI<sup>ème</sup> siècle.

La synthèse de biocarburants est une solution répondant à cet enjeu économique et environnemental. Il en existe trois types ou générations :

**Première génération** issus de produits alimentaires : biodiesel (huiles de colza, tournesol, soja) incorporé au diesel et éthanol incorporé à l'essence (SP95-E10). Problème : concurrence avec les cultures vivrière.

**Deuxième génération** destinés à ne pas entrer en concurrence avec les cultures vivrières par l'utilisation de résidus agricoles et forestiers, ou de cultures dédiées de plantes à croissance rapide. Problème : mobilisations des sols, estimée à deux millions d'hectares en France en 2010.

**Troisième génération** obtenus à partir d'algues, ils sont encore à l'étude. Cette génération permettrait de limiter les problématiques d'usage des sols et de concurrence avec les débouchés alimentaires.

⚡ JFLM 2 La synthèse d'un ester qui servirait de carburant, à partir d'huiles végétales, a été expérimentée avec succès. Cette méthode présente trois avantages : tout d'abord, c'est une voie de recyclage des huiles usagés ; ensuite, le carburant synthétisé ne contient pas de composé soufré<sup>5</sup> et ne participe donc pas à la formation des pluies acides ; enfin, le carbone rejeté dans l'atmosphère lors de l'utilisation du carburant est une restitution du CO<sub>2</sub> fixé lors de la croissance de la plante (figure 1). Un tel carburant ne participe donc pas à l'augmentation de l'effet de serre.



Figure 1 – Cycle du carbone du bioéthanol. ⚡ Sirius.

2. À plus haute température, les réactifs aussi sont retirés du milieu réactionnel, ce qui est contre-productif. Pour s'assurer que cela ne se produit pas, il faudrait pouvoir maintenir la température à une valeur inférieure ou égale à 117 °C, ce qui n'est pas possible avec les fours domestiques. On suppose seulement que le temps de réaction est trop court pour atteindre une température trop élevée. Attention avec le protocole du Daumarie qui, justement, fait trop chauffer le milieu réactionnel.

3. La houille est une roche carbonée sédimentaire provenant de la carbonisation d'organismes végétaux et pouvant servir de combustible fossile. L'appellation courante de charbon désigne généralement la houille.

4. La biomasse peut être toute matière organique d'origine végétale (microalgues incluses), animale, bactérienne ou fongique (champignons).

5. Un seul "f" à soufre svp. ©JFLM

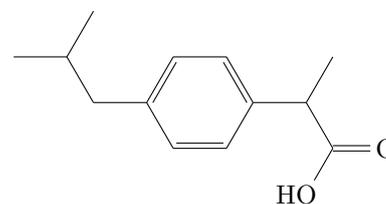
### 1.3 Maximiser l'utilisation des réactifs : synthèse de l'ibuprofène

⇒ **Principes : 2, 8, 9.** ↗ **Microméga, culturesciences**<sup>6</sup>

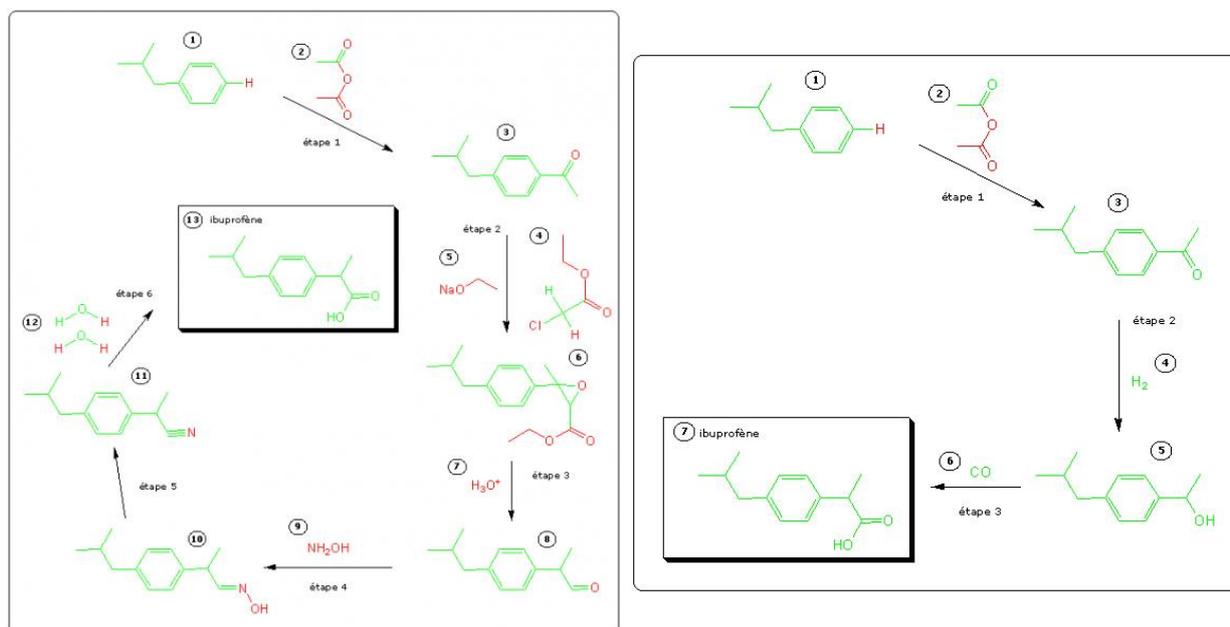
La recherche de procédés durables et respectueux de l'environnement se fait également par la conception de nouvelles méthodes respectant les principes de la chimie verte. Un bon exemple est la synthèse de l'ibuprofène.

L'ibuprofène<sup>7</sup> (figure 2) est un analgésique<sup>8</sup> (anti-douleur) et un anti-inflammatoire au même titre que l'aspirine. C'est le constituant actif de nombreux produits commerciaux et il fait partie des anti-douleurs en vente libre les plus répandus<sup>9</sup>. La molécule a été découverte par la société Boots dans les années 1960 et cette société a breveté une synthèse qui a longtemps été la méthode de choix pour la production industrielle (figure 3a). Cette synthèse a permis de produire annuellement des milliers de tonnes d'ibuprofène mais elle s'est accompagnée de la formation d'une quantité encore plus importante de sous-produits non utilisés et non recyclés qu'il a fallu détruire ou retraiter.

Dans les années 1990, la société BHC a mis au point un procédé "vert", c'est à dire reposant sur les principes de la chimie verte : une chimie qui réduit la pollution à la source et qui est plus respectueuse de l'environnement. La nouvelle voie de synthèse est beaucoup plus efficace que la voie traditionnelle : la quantité de sous-produit est considérablement réduite, de plus l'unique sous-produit formé est valorisé (figure 3b).



**Figure 2** – Représentation topologique de l'ibuprofène. Il est à noter que l'énantiomère *S* est le plus efficace.



**Figure 3** – Étapes de la synthèse de l'ibuprofène par procédé Boots (gauche) et BHC (droite). Source : [culturesciences.chimie.ens.fr](http://culturesciences.chimie.ens.fr). Dans les schémas de synthèse ci-dessus sont représentés en vert les atomes qui se retrouvent dans la molécule cible et en rouge ceux qui forment des sous-produits à retraiter. Les étapes 2 et 3 du procédé BHC sont catalysés par Ni de Raney et par Pd.

L'efficacité d'un procédé est traditionnellement mesurée par le rendement chimique, sans tenir compte de la quantité de sous-produits formés. Dans une optique de réduction de la pollution à la source, la chimie verte propose une évolution du concept d'efficacité qui prend en compte la minimisation de la quantité de déchets. On utilise comme indicateur de l'efficacité d'un procédé son utilisation atomique (UA), définie comme le rapport de la masse molaire du produit recherché sur la somme des masses molaires de tous les produits qui apparaissent dans l'équation stœchiométrique.

$$UA = \frac{M(\text{produit désiré})}{\sum_i M(\text{produit } i)} = \frac{M(\text{produit désiré})}{\sum_j M(\text{réactif } j)} \quad (1)$$

6. <http://culturesciences.chimie.ens.fr/content/un-exemple-de-chimie-verte-la-synthese-industrielle-de-libuprofene-787>

7. L'ibuprofène fait partie de la liste des médicaments essentiels de l'OMS. Il est commercialisé sous divers noms commerciaux, par exemple Brufen, Advil, Nurofen, Upfen, Motrin, Algifen, Algifor. La production industrielle annuelle est d'environ 13 000 tonnes.

8. L'action analgésique et anti-inflammatoire de l'ibuprofène repose sur l'inhibition de la synthèse des médiateurs chimiques de la douleur et de l'inflammation.

9. L'ibuprofène présente à ce jour une contre-indication chez l'enfant de moins de 15 ans : il ne doit pas être utilisé en cas de varicelle ou de suspicion de varicelle.

Le facteur E, introduit par Sheldon<sup>10</sup>, est défini comme le rapport massique déchet/produit désiré :

$$E = \frac{\sum_i M(\text{déchet } i)}{M(\text{produit désiré})} = \frac{1}{\text{UA}} - 1 \quad (2)$$

Un procédé sera donc d'autant plus efficace que son facteur UA sera proche de 1, et donc que son facteur E proche de 0. Calculons l'utilisation atomique des deux procédés de synthèse de l'ibuprofène, sachant  $M(\text{ibuprofène}) = 206 \text{ g mol}^{-1}$  :

Procédé Boots

Réactif	Formule brute	$M \text{ (g mol}^{-1}\text{)}$
Isobutylbenzène	$\text{C}_{10}\text{H}_{14}$	134
Anhydride acétique	$\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_3$	102
4	$\text{C}_4\text{H}_7\text{ClO}_2$	122,5
5	$\text{C}_2\text{H}_5\text{ONa}$	68
7	$\text{H}_3\text{O}^+$	19
9	$\text{NH}_3\text{O}$	33
12	$2 \text{H}_2\text{O}$	36

Procédé BHC

Réactif	Formule brute	$M \text{ (g mol}^{-1}\text{)}$
Isobutylbenzène	$\text{C}_{10}\text{H}_{14}$	134
Anhydride acétique	$\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_3$	102
Dihydrogène	$\text{H}_2$	2
Monoxyde de carbone	$\text{CO}$	28

$$\text{UA} = \frac{M(\text{produit désiré})}{\sum_j M(\text{réactif } j)} = \frac{206}{514,5} = \boxed{0,4} \quad (3)$$

$$\text{UA} = \frac{206}{266} = \boxed{0,77} \quad (4)$$

Le gain offert par le procédé BHC sur le procédé Boots est considérable. Il faut de plus noter que, dans le cas du procédé BHC, le sous-produit obtenu au cours de l'étape 1, qui est le seul sous-produit, est l'acide éthanoïque. Il est séparé du mélange réactionnel et purifié : l'unité de production d'ibuprofène est dans la pratique couplée à une unité de production d'acide éthanoïque<sup>11</sup>. L'utilisation atomique peut donc être considérée comme égale à 100%.

Le procédé BHC permet dans ce cas particulier de réduire la quantité de déchets à retraiter à zéro. Il offre aussi d'autres avantages. Comme il ne fait appel qu'à trois étapes contre six pour le procédé traditionnel, le débit de la chaîne de synthèse est plus important, ce qui peut se traduire en avantage économique pour le fabricant. Le rendement chimique est aussi particulièrement sensible à ce paramètre. En effet, en supposant un rendement chimique de 90%<sup>12</sup> pour chaque étape de la synthèse, le procédé Boots propose un rendement final de 53%, contre 73% pour le procédé BHC.

Il est capital de remarquer que le procédé BHC n'est pas seulement un procédé moins polluant, il permet également au fabricant de réduire ses dépenses grâce à :

- la diminution de la quantité de déchet (donc des frais de retraitement).
- la diminution du nombre d'étapes qui entraîne d'une part une réduction des coûts de séparation et de purification, et d'autre part une augmentation de la capacité de production puisque la synthèse prend désormais moins de temps.

Les procédés verts sont donc conçus pour être à la fois respectueux de l'environnement et économiquement viables. En effet, la rentabilité du procédé est un prérequis indispensable dans le monde industriel.

10. R. A. Sheldon, *Atom utilisation, E factors and the catalytic solution* C. R. Acad. Sci. Paris, Série IIc (2000) 541.

11. L'acide éthanoïque  $\text{CH}_3\text{COOH}$  est un composé de base de l'industrie chimique. C'est en particulier un précurseur de l'acétate de vinyle  $\text{CH}_3\text{COOCH}=\text{CH}_2$  dont le polymère est utilisé pour fabriquer des peintures et des adhésifs. De plus, il a été utilisé dans cette leçon pour synthétiser un ester de poire/banane, qui permet de réaliser de délicieux bonbons au goût on ne peut plus naturel.

12. Pure hypothèse. #YOLO

## 2 Mieux utiliser les solvants

**Principe 5.** Importance des solvants en chimie organique : permet de stabiliser certaines espèces, de se faire rencontrer deux molécules pour qu'elles réagissent ... Mais il en faut souvent de grandes quantités par rapport à celles effectivement en jeu pour la transformation chimique réalisée.

### 2.1 Synthèse sans solvant

⇒ **Principes** : 2, 5, 9.

#### Préparation initiale pour les manips de la leçon

Dans un mortier en porcelaine, placer 680 mg <sup>a</sup> (5,0 mmol) de 4-méthoxybenzaldéhyde, 670 mg <sup>b</sup> (5,0 mmol) de 4-méthylacétophénone et 200 mg (5,0 mmol) de NaOH solide <sup>c</sup>. Broyer le mélange pendant environ 5-10 min <sup>d</sup> jusqu'à ce que le mélange se solidifie et se morcelle en petits fragments.

Ajouter 10 mL d'eau distillée et mélanger le tout intimement en délogeant le solide se trouvant sur les parois du mortier à l'aide du pilon ou d'une spatule.

Réaliser **très soigneusement** la filtration décrite ci-dessous afin d'obtenir la solution à titrer. Préparer un second mortier pour la leçon qui servira à faire la filtration en direct. Au choix, broyer également en direct ou non.

a.  $\simeq$  0,60 mL

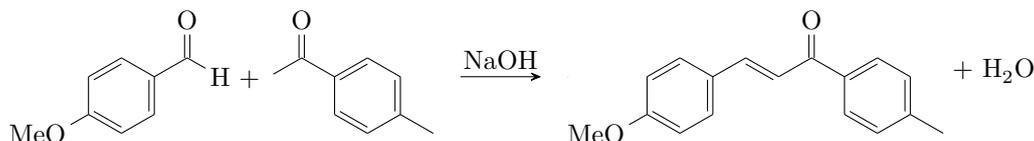
b.  $\simeq$  0,65 mL

c. Cette réaction peut être adaptée à des quantités plus importantes avec des résultats similaires.

d. Le mélange doit rapidement devenir jaune et pâteux.

Intérêt de la synthèse sans solvant : pas besoin de le recycler, d'autant plus qu'il serait utilisé en bien plus grande quantité que les réactifs.

Réaction de formation d'une chalcone à partir de 4-méthoxybenzaldéhyde et de 4-méthylacétophénone avec catalyse basique (aldolisation + crotonisation = condensation aldolique *aka* réaction de Claisen-Schmidt) :



#### Synthèse d'une chalcone - filtration

⚡ Drouin

⊖ 5 min

Filtrer la suspension à l'aide d'un entonnoir conique à verre fritté ( $\varnothing$ 18 mm, porosité 4 <sup>a</sup>). Rincer le mortier et le pilon avec 5 mL d'eau distillée qui sont aussi filtrés. Laver le solide avec une nouvelle portion de 5 mL d'eau distillée, tasser à l'aide d'un tapon et laisser sécher sous pression réduite durant 10 min <sup>b</sup>. Récupérer le filtrat <sup>c</sup>.

a. Porosité 2 selon JFLM.

b. Cette toute dernière étape ne sera donc pas, bien entendu, réalisée en leçon.

c. Pour la manip faite en direct, ce n'est donc pas la peine.

#### Synthèse d'une chalcone - dosage du catalyseur

⚡ Drouin

⊖ 10 min

Le filtrat doit contenir, si le produit a été rigoureusement rincé, la soude ayant servi de catalyseur. L'intérêt de cette expérience est de vérifier que l'on a récupéré toute la soude initialement présente, et qu'elle n'est donc pas perdue lors du processus. En effet, il ne suffit pas de montrer qu'un composé ajouté augmente la vitesse d'une réaction pour revendiquer avoir montré que c'est un catalyseur, il faut aussi montrer qu'il n'est pas consommé. Mettre le filtrat dans une fiole jaugée de 50 mL, rincer le matériel à l'eau et joindre les eaux de lavage. Finir la dilution.

Prélever avec une pipette jaugée 10,0 mL du contenu de la fiole jaugée. Ajouter du BBT et titrer avec HCl 0,1 M. En déduire la quantité de soude dans le filtrat et comparer à la quantité de soude initialement introduite <sup>a</sup>.

a. Pour la présentation en live, prévoir de faire uniquement le dosage, éventuellement la dilution. Une feuille excel pour obtenir la quantité de soude à partir du volume équivalent peut être une bonne idée pour ne pas s'emmêler les pinceaux pendant l'oral.

## 2.2 CO<sub>2</sub> supercritique

⇒ **Principes : 1, 5, 7.** ⚡ **Sirius, Microméga, BUP799**

Dans les domaines agroalimentaire et pharmacologique, l'extraction est une opération industrielle importante. Elle peut être réalisée selon trois procédés :

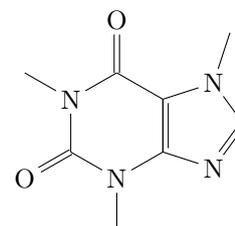
- extraction à l'eau
- extraction par solvant organique
- extraction par solvant supercritique

Selon les conditions de pression et de température, un corps pur peut exister sous différents états : solide, liquide, gaz ... Il existe un état appelé fluide supercritique, dont les propriétés sont intermédiaires entre celles du gaz et du liquide. Un tel état est typiquement obtenu à haute pression et haute température au-delà d'un point dans un diagramme ( $P, T$ ) appelé point critique. Dans le cas du CO<sub>2</sub>, le point critique est à  $P_c = 73,8$  bars et  $T_c = 31^\circ\text{C}$ . La pression est donc bien plus élevée que la pression atmosphérique, en revanche la température est presque la température ambiante, ce qui présente l'avantage de ne pas dégrader certaines molécules à extraire comme elles pourraient l'être lors d'une hydrodistillation.

Pour la fabrication de café décaféiné, la caféine (figure 4) a longtemps été extraite par le dichlorométhane, des raisons de santé (traces résiduelles du solvant, toxique), d'impact sur l'environnement, de coût et de saveur, ont motivé la recherche d'un nouveau procédé. Le dioxyde de carbone supercritique permet de solubiliser la plupart des espèces organiques de faible masse moléculaire, comme la caféine. Une fois l'extraction réalisée, une diminution de pression permet au fluide de se transformer en gaz, laissant ainsi la caféine pure.

Ce procédé d'extraction est également utilisé pour débarrasser le houblon de son amertume ou le liège des chlorophénols et des chloroanisoles, responsables du goût de bouchon dans le vin.

Ce type de procédé présente également l'avantage de valoriser le CO<sub>2</sub>, ce qui limite sa libération dans l'atmosphère.



**Figure 4** – Représentation topologique de la caféine.  $M = 194 \text{ g mol}^{-1}$ .

## Conclusion

- Enjeu important : futur, société.
- UA (et E) : nouveau critère, le rendement chimique n'est pas suffisant à lui seul pour quantifier la qualité d'un procédé donné.
- Plusieurs pistes.
- Intérêt économique : souvent, le procédé durable est moins coûteux (économie sur le traitement des déchets, la quantité de matières premières ...)!

**Ouverture** polymères biodégradables<sup>13</sup>. Pour la valorisation du CO<sub>2</sub> : synthèse de produits chimiques de base (urée) ou plus complexes par l'intermédiaire de la photosynthèse au sein d'organismes biologiques.

13. Qui pourront être abordés à l'occasion de la leçon sur les polymères, la LC03.

## Bingo des leçons et montages

Soyez attentifs!

la "droite" tracée n'en est pas une	faute de français au tableau ou dans le poly	"Perez" dans la bibliographie	appropriation du matériel ("mon bécher")
l'ordinateur plante	Christopher dit "mokay"	carbone pentavalent ou égalité entre scalaire et vecteur	un correcteur est en retard (> 5 min)
un autre membre de l'auditoire fait le bingo	mauvais usage des gants (oubli ou utilisation abusive)	un calcul relativiste sauvage apparaît	"Tout le monde sait que ..." (variantes comprises)
explosion ou bruit suspect pendant une expérience	formule non homogène au tableau	"On voit bien que ..." (mais on ne voit rien)	"Physique expérimentale" dans la bibliographie