

# QUAND LA CHIMIE PASSE AU VERT

Par Maxime Duez,

professeur de physique-chimie,  
lycée Stéphane-Hessel, Épernay (51)

■ **QU'IL S'AGISSE DE PRODUIRE DES COMPOSÉS CHIMIQUES** dans les domaines de l'alimentation, du médicament, des engrais, des pesticides ou des matériaux, la chimie fait partie intégrante de notre quotidien. Synonyme de progrès au xx<sup>e</sup> siècle, l'image de la chimie s'est fortement dégradée depuis, notamment à cause de son impact sur l'environnement et la santé. Pour répondre aux défis du xxi<sup>e</sup> siècle, le secteur est en pleine mutation et tend à promouvoir une chimie plus durable, une « chimie verte ».

Le but de cette activité documentaire est d'aborder quelques principes de la chimie verte au travers d'exemples concrets, et de les mettre en application dans le choix de voies de synthèse écoresponsables.

On pourra ainsi faire découvrir aux élèves l'intérêt des notions d'économie d'atomes et de limitation des déchets dans le choix de procédés écoresponsables. Il s'agit ici de leur faire comprendre que l'industrie chimique évolue dans ses pratiques, en privilégiant des voies de synthèses comportant moins d'étapes, produisant moins de déchets, conciliant autant que possible le rendement et un impact moindre sur l'environnement.

## PLACE DANS LES PROGRAMMES

Cette activité illustre le thème « Constitution et transformations de la matière » et le sous-thème « Élaborer des stratégies en synthèse organique ». Il s'agit d'aborder la notion de stratégie de synthèse multi-étapes répandue dans l'industrie chimique et de permettre aux élèves de s'approprier le concept de synthèse écoresponsable. En effet, la mise en œuvre du nouveau programme de physique-chimie en classe de terminale générale est l'occasion de les sensibiliser à des questions liées au développement durable et à l'éducation à l'environnement (cf. le [préambule du programme](#)).

Ainsi, les élèves doivent être capables de discuter l'impact environnemental d'une synthèse et de proposer des améliorations à l'aide de données fournies, par exemple en matière d'énergie, de formation et de valorisation de sous-produits, et de choix des réactifs et solvants.

## POSITIONNEMENT AU SEIN DE LA SÉQUENCE ET PRÉREQUIS

Cette séance d'une heure nécessite d'avoir étudié au préalable les catégories de réaction (substitution, addition, élimination).

Elle peut se décomposer en deux temps :

- un temps de réflexion individuel sur les parties 1 (analyser) et 2 (réaliser), de 35 minutes ;
- un temps de réflexion collective de 20 minutes, en groupes, sur la partie 3 (valider/communiquer), afin de favoriser le débat entre les élèves.

Cette activité peut faire l'objet d'une restitution en fin de séance et d'une évaluation formative.

## SAVOIR +

**Anastas Paul, Warner John**, *Green Chemistry, Theory and Practice*, Oxford University Press, Oxford, 1998.

**Arnaud Paul**, *Les Cours de Paul Arnaud. Chimie organique*, Dunod, Malakoff, 2015 (19<sup>e</sup> éd.), « La chimie verte », p. 593.

**Sarrade Stéphane**, *Quelles sont les ressources de la chimie verte ?*, EDP sciences, Les Ulis, 2008.

**Sarrade Stéphane**, *La Chimie d'une planète durable*, Le Pommier, Paris, 2011.

« [La chimie verte](#) » [2005], article en ligne rédigé par Hagop Demirdjian, professeur agrégé à l'ENS, dans le cadre du dossier disciplinaire sur l'EEDD proposé par le site de ressources en chimie pour l'enseignant [CultureSciences-Chimie](#) (Eduscol-ENS).

## PRÉSENTATION DES DOCUMENTS

### DOCUMENT 1.

#### LES 12 PRINCIPES DE LA CHIMIE VERTE

Lorsqu'on parle de chimie verte, on ne parle pas seulement d'utiliser des réactifs agro-sourcés, mais également d'agir sur les solvants, l'énergie, les déchets et le produit fini. En 1998, les chimistes américains Paul Anastas et John Warner ont érigé 12 principes fondateurs d'une chimie durable (ou verte) :

1. Limiter la pollution à la source
2. Économie d'atomes
3. Synthèses chimiques moins toxiques
4. Produits chimiques plus sûrs
5. Réduire l'utilisation de solvants et d'auxiliaires
6. Dépense énergétique
7. Matières premières renouvelables
8. Réduire les produits dérivés (groupes protecteurs)
9. Catalyse
10. Conception de la dégradation finale
11. Analyse en temps réel pour prévenir la pollution
12. Minimiser le risque d'accidents

Source : d'après Anastas P., Warner J., *Green Chemistry, Theory and Practice*, Oxford University Press, Oxford, 1998 (traduit par l'auteur).

### DOCUMENT 2.

#### UN CONCEPT NOUVEAU : L'UTILISATION ATOMIQUE (UA)

La notion de rendement ne suffit plus pour évaluer l'efficacité des procédés chimiques. Essayer de mettre en œuvre une chimie verte impose de prendre en compte un concept nouveau introduit par le chimiste américain Barry Trost en 1991 : l'utilisation atomique (UA). Cette grandeur permet d'évaluer le nombre d'atomes fournis par les réactifs et qui se retrouvent engagés dans le produit utile de la réaction. Il s'agit d'un indicateur important de l'efficacité des voies de synthèse, afin d'optimiser les procédés existants et de développer de nouvelles stratégies de synthèse.

Ainsi, plus l'utilisation atomique est élevée, meilleure est l'économie d'atomes, et plus le procédé peut s'inscrire dans une démarche de chimie verte.

Calcul de UA (%) :

Soit la transformation  $a A + b B \rightarrow c C + d D$  avec C le produit recherché.

Alors

$$UA (\%) = \frac{c \times M(C)}{a \times M(A) + b \times M(B)} \times 100 \text{ avec } M \text{ la masse molaire}$$

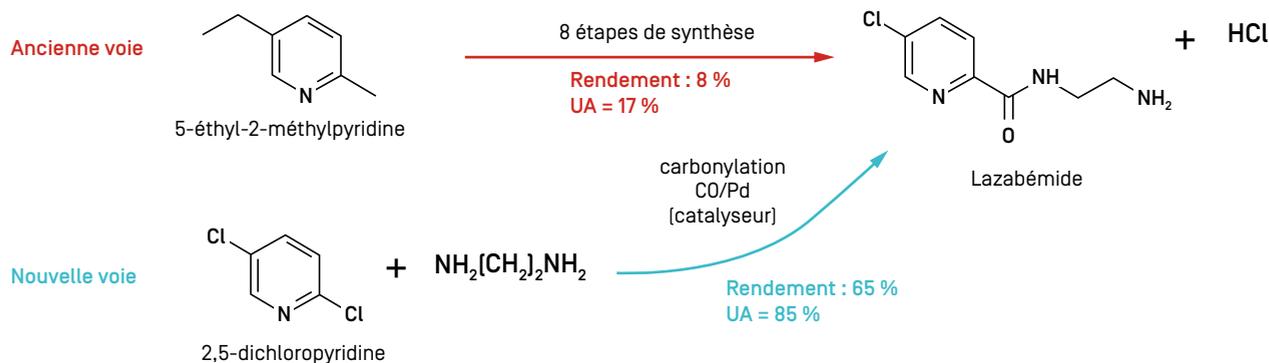
Cet indicateur n'est pas suffisant à lui seul pour mesurer l'impact environnemental d'un procédé, puisque le calcul ne tient pas compte des solvants ni du fait que des réactifs peuvent être introduits en excès.

Source : Trost B. M., « The atom economy, a search for synthetic efficiency », *Science*, vol. 254, n° 5037, 1991, p. 1471.

### DOCUMENT 3.

#### EXEMPLE DE LA SYNTHÈSE D'UN MÉDICAMENT

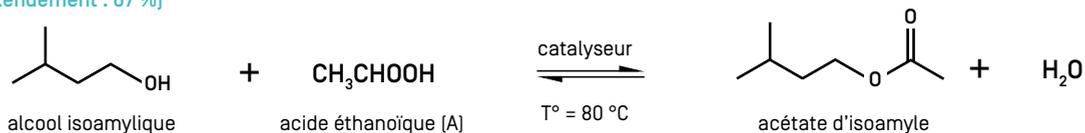
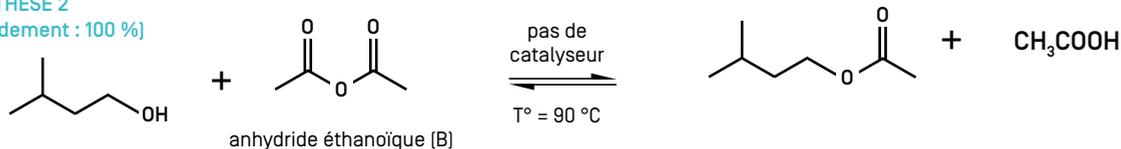
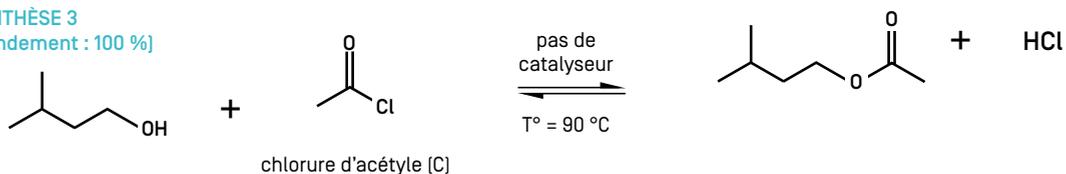
Le Lazabémide® est un antidépresseur qui pourrait être utilisé dans le futur pour soigner les maladies de Parkinson et d'Alzheimer. Récemment, la société Hoffman-La Roche a modifié son procédé de synthèse.



Source : une activité documentaire sur « la chimie durable » produite par l'académie d'Orléans-Tours, [En ligne] : sur <http://physique.ac-orleans-tours.fr/>, rechercher « Doc 1 Le long chemin de la chimie vers la durabilité ».

**DOCUMENT 4.**  
**LES VOIES DE SYNTHÈSE D'UN ARÔME DE BANANE**

De nombreux produits alimentaires à la saveur de banane contiennent un ester : l'acétate d'isoamyle. Il existe plusieurs voies de synthèse de cet ester.

**SYNTHÈSE 1**  
 [Rendement : 67 %]

**SYNTHÈSE 2**  
 [Rendement : 100 %]

**SYNTHÈSE 3**  
 [Rendement : 100 %]

**Données concernant la synthèse de l'acétate d'isoamyle**

Molécules	acétate d'isoamyle	alcool isoamylique	anhydride éthanóïque (A)	acide éthanóïque (B)	chlorure d'acétyle (C)	eau
M [g.mol <sup>-1</sup> ]	130,19	88,15	102,09	60,05	78,50	18,00
Pictogrammes		 	 	 	 	

© INRS

Le coût des réactifs A, B et C est sensiblement le même.

Source : une activité documentaire sur « la chimie durable » produite par l'académie d'Orléans-Tours, [En ligne] : sur <http://physique.ac-orleans-tours.fr/>, rechercher « Doc 1 Le long chemin de la chimie vers la durabilité ».

## PISTES PÉDAGOGIQUES

### 1) UTILISATION ATOMIQUE ET CHIMIE VERTE (ANALYSER)

- Quel principe de la chimie verte porte sur l'utilisation atomique? Justifiez.
- Selon vous, comment devra être la valeur de l'UA pour suivre ce principe?
- Parmi les grandes catégories de transformations chimiques en chimie organique que vous avez étudiées (substitution, addition, élimination), laquelle doit être privilégiée pour l'économie d'atomes? Expliquez.
- En quoi la nouvelle voie de synthèse du Lazabémide® s'inscrit-elle dans une chimie verte et durable?

### 2) CALCUL DE L'UTILISATION ATOMIQUE (RÉALISER)

Déterminez l'indice UA (%) de chaque voie de synthèse de l'acétate d'isoamyle.

### 3) CHOIX D'UNE VOIE DE SYNTHÈSE PLUS VERTE (VALIDER/COMMUNIQUER)

Expliquez quelle voie de synthèse de l'acétate d'isoamyle semble la mieux correspondre à une démarche compatible avec les principes de la chimie verte.

### 3) CHOIX D'UNE VOIE DE SYNTHÈSE PLUS VERTE (VALIDER/COMMUNIQUER)

Si on se base sur le seul critère de l'utilisation atomique, la voie de synthèse 1 semble la meilleure. De plus, le sous-produit de la réaction est l'eau et ne pose pas de problème de traitement après isolation.

Cependant, le rendement est plus faible que pour les deux autres voies de synthèse (67 % contre 100 %), ce qui représente une perte non négligeable pour l'industrie et nécessite d'utiliser davantage de réactifs pour produire une même quantité d'acétate d'isoamyle.

Par conséquent, la voie de synthèse 3 représente un bon compromis entre rendement et utilisation atomique, et peut correspondre à une démarche compatible avec les principes de la chimie verte, à condition que le sous-produit HCl soit traité ou réutilisé pour une autre synthèse. ■■

## ÉLÉMENTS DE RÉPONSE

### 1) UTILISATION ATOMIQUE ET CHIMIE VERTE (ANALYSER)

- L'utilisation atomique est un indicateur de l'économie d'atomes lors d'une synthèse. Il porte donc sur le principe n° 2 de la chimie verte.
- D'après le document 2, plus la valeur de l'UA est proche de 100 %, plus le processus de synthèse suivra le principe n° 2.
- Une réaction d'addition permet d'obtenir le produit désiré sans sous-produit, ce que ne permet pas de faire une réaction de substitution ou d'élimination. Ainsi, l'économie d'atomes est optimale dans une réaction d'addition puisque tous les atomes engagés par les réactifs se retrouvent dans le produit (UA = 100 %).
- La nouvelle voie de synthèse du Lazabémide® s'inscrit dans une chimie verte et durable pour plusieurs raisons :
  - une seule étape de synthèse au lieu de 8 (économie d'énergie, de solvant, de temps);
  - une meilleure utilisation atomique (85 % contre 17 %);
  - un meilleur rendement (économie de réactifs, moins de déchets).

### 2) CALCUL DE L'UTILISATION ATOMIQUE (RÉALISER)

	Synthèse 1	Synthèse 2	Synthèse 3
UA [%]	87,8	68,4	78,1