

Compétences

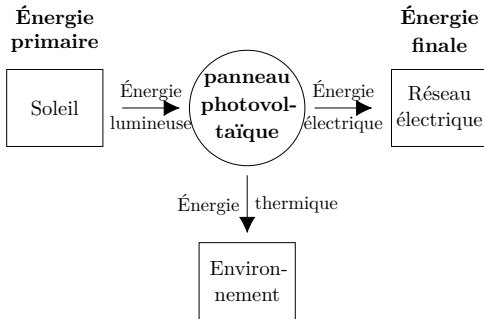
Voici les compétences que vous devez acquérir à l'issue de ce cours :

- Résoudre les problèmes énergétiques contemporains et futurs ;
- Réaliser un bilan énergétique d'une habitation ou d'un mode de transport ;
- Trouver et discuter des solutions permettant d'économiser l'énergie ;
- Connaître les douze principes de la chimie verte ;
- Savoir discuter des avantages et inconvénients d'une voie de synthèse, y inclus du point de vue du respect de l'environnement ;
- Avoir abordé une méthode de valorisation du dioxyde de carbone.

## 1 Problèmes énergétiques actuels

### 1.1 Énergie primaire, énergie finale

Voici un exemple de **chaîne énergétique**, celle d'un panneau photovoltaïque, avec une énergie primaire et une énergie finale :



Définitions

- L'**énergie primaire** (1) provient d'une ressource disponible dans la nature avant transformation.
- L'**énergie finale** (2) est l'énergie consommée par le consommateur au bout de la chaîne énergétique de production.

Les énergies primaires sont issues de ressources non renouvelables (hydrocarbures, combustible nucléaire...) soit de ressources renouvelables (Soleil, vent, eau, géothermie, biomasse...), rapidement disponibles et régénérables.

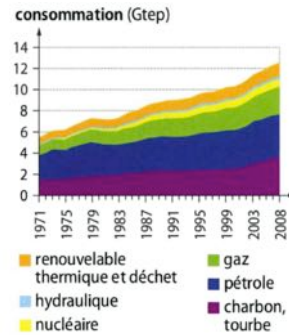
Exemple

L'énergie électrique est une énergie finale.

La consommation énergétique mondiale (énergie finale) suit la croissance de la population mondiale et ses besoins. Elle a doublé depuis 1974 et, selon les prévisions, elle doublera à nouveau d'ici 2050.

### 1.2 Problèmes énergétiques

Le « mix » ou « bouquet » énergétique représente la proportion des différentes énergies primaires utilisées. Pour comparer les différentes formes d'énergie entre elles, on utilise la « tonne équivalent pétrole » (tep en abrégé), avec  $1 \text{ Gtep} = 4,2 \times 10^{19} \text{ J}$ .



Les hydrocarbures (pétrole, gaz, charbon) constituent l'essentiel de la consommation énergétique primaire mondiale, mais leurs réserves sont limitées. De plus, leur utilisation participe à la pollution atmosphérique et contribuerait au changement climatique.

Conclusion

L'humanité doit faire face à une triple contrainte majeure :

- **développer** (3) l'accès à l'énergie pour l'ensemble de la population ;
- **minimiser** (4) l'impact de l'activité humaine sur l'environnement ;
- **économiser** (5) les ressources fossiles non renouvelables.

### 1.3 Le projet ITER

Avec le site du réacteur thermonucléaire expérimental international (ITER) qui se construit en France, une

nouvelle énergie primaire sur la Terre, exploitant la fusion nucléaire, sera peut-être disponible dans quelques décennies.

### 1.4 Conclusion (partielle et temporaire)

Conclusion

- La consommation énergétique finale mondiale **augmente** (6), tandis que les ressources fossiles **diminuent** (7) ;
- L'utilisation des hydrocarbures augmente la **pollution** (8) et l'effet de serre.

## 2 Bilans énergétiques

### 2.1 Consommation d'énergie en France

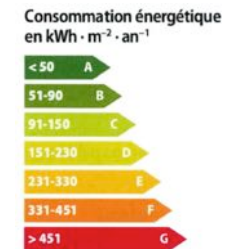
L'étude des consommations d'énergie finale par secteur révèle qu'en France les bâtiments consomment plus de 40 % de l'énergie finale et les transports plus de 30 %. Ces deux secteurs représentent les plus grands potentiels en matière d'économie d'énergie.

Exemple

En hiver, la température à l'intérieur d'une habitation peut être maintenue constante si les pertes énergétiques thermiques (par conduction par les cloisons, vitres et portes, ou pertes par aération et fuites d'air...) sont compensées par des apports de chaleur (chauffage, éclairage, appareils ménagers, habitants...).

Effectuer le bilan énergétique d'un bâtiment ou d'un véhicule, c'est recenser les apports et les pertes énergétiques qui sont mis en jeu, les uns devant compenser les autres.

Depuis 2007, le **diagnostic de performance énergétique** (DPE) rend compte de l'énergie consommée par le bâtiment, en  $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$ . Ainsi, les bâtiments sont classés des plus économes (A) aux plus énergivores (G).



### 2.2 Dans le domaine de l'habitat

Dans l'habitat, 65 % de l'énergie est utilisée pour se chauffer et 12 % pour produire de l'eau chaude sanitaire.

Principe

On dit qu'un bâtiment est en **régime permanent** lorsque son énergie totale **se conserve** (9). Les apports compensent alors les pertes :

$$\Delta E_{\text{totale}} = \Delta E_{\text{apports}} - \Delta E_{\text{pertes}} = 0$$

### 2.3 Dans le domaine des transports

Le secteur des transports connaît la plus forte croissance en termes de consommation d'énergie. Les études prévoient une poussée de la demande de 50 % pour le transport de marchandises et de 35 % pour le transport de passagers d'ici 2020 dans l'UE.

**Près de 98 %, de l'énergie consommée provient**

**des carburants fossiles**, qui sont des sources d'émission de gaz à effet de serre et de polluants de l'air.

Dans un véhicule, l'énergie fournie aux roues compense les pertes dues aux frottements de l'air (aérodynamisme) et de la chaussée (roulement et freinage).

#### Propriété

Quand le véhicule fonctionne en **régime permanent** (10), son énergie totale se conserve :

$$\Delta E_{\text{totale}} = \Delta E_{\text{apports}} - \Delta E_{\text{pertes}} = 0$$

Lorsqu'on effectue le **bilan énergétique** global d'un véhicule ou d'un appareil, il est nécessaire de prendre en compte toute la chaîne énergétique, de l'**énergie primaire** (11) (le « puits ») à l'**énergie utile** (12) (la « roue »). À chaque transformation d'une forme d'énergie en une autre par une machine, on peut définir un **rendement**, rapport de l'énergie utile sur l'énergie reçue.

## 3 Solutions pour économiser l'énergie

### 3.1 L'habitat basse consommation

La première solution pour économiser l'énergie dans l'habitat est de limiter les **pertes** (15) d'énergie. Les nouvelles habitations prennent en compte le climat, sont mieux orientées et mieux isolées grâce à l'utilisation de nouvelles techniques ou de nouveaux matériaux.

Pour économiser l'énergie dans l'habitat, on peut aussi utiliser des énergies renouvelables décentralisées, pour limiter les pertes lors du transport.

### 3.2 Les économies d'énergie dans les transports

Économiser l'énergie dans les transports demeure un vrai défi. Seuls les comportements individuels privilégiant les déplacements en mode doux (à pied ou à vélo), les transports en commun ou le covoiturage

$$\eta = \frac{E_{\text{utile}}}{E_{\text{reçue}}} \quad \text{avec} \quad \eta < 1 \quad \text{ou} \quad 100 \%$$

#### Exemple

Le rendement total d'un véhicule à moteur à explosion est de l'ordre de 30 %, celui du véhicule électrique est de l'ordre de 10 %, en tenant compte de toutes les transformations et transports d'énergie nécessaire.

### 2.4 Conclusion (partielle et temporaire)

#### Conclusion

- Dans l'habitat ou le transport, les **apports énergétiques** (13) doivent compenser les pertes énergétiques ;
- Un **bilan énergétique global** (14) s'effectue depuis la source primaire jusqu'à l'énergie utile.

apportent un gain définitif.

Mais les multiples efforts scientifiques et techniques participent également à ces économies :

- en améliorant le **rendement** (16) énergétique des véhicules actuels (thermique, hybride ou électrique) ;
- en développant de nouvelles **chaînes énergétiques** (17) pour remplacer les hydrocarbures fossiles (biocarburants, la pile à combustible utilisant le dihydrogène...) et de nouveaux modes de stockage de l'énergie.

### 3.3 Conclusion (temporaire et partielle)

L'amélioration de la performance énergétique, le développement des énergies renouvelables ou de nouvelles chaînes énergétiques permettent des économies d'énergie substantielles.

## 4 Vers une chimie plus responsable

L'objet de la chimie est de fournir, à partir de matières premières prélevées dans la nature, les matériaux et les substances (médicament, additifs alimentaires, engrais, etc.) dont l'Homme a besoin.

La chimie est **durable** (18) (ou verte) si cette production se fait tout en laissant aux générations futures suffisamment de matières premières et d'énergie pour leurs propres besoins.

### 4.1 Économiser les atomes

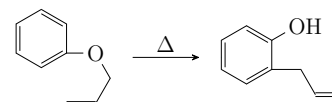
Faire le **bilan d'atomes** d'une réaction chimique consiste à comparer la quantité (= le nombre, tel qu'il apparaît dans l'équation-bilan) d'atomes des réactifs nécessaires à celle des produits *valorisables*, c'est-à-dire directement utiles pour la société ou ultérieurement réinvestis dans d'autres réactions chimiques.

L'**économie d'atome** EA d'une synthèse, aussi appelée « **utilisation atomique** » UA, est donnée par le rapport, exprimé en %, entre la masse molaire du produit recherché et la somme de celles des réactifs, chaque masse molaire devant être affectée du nombre stœchiométrique  $\nu$  correspondant :

$$UA = \frac{\nu \cdot M(\text{produit souhaité})}{\sum_i \nu_i \cdot M_i(\text{réactif})}$$

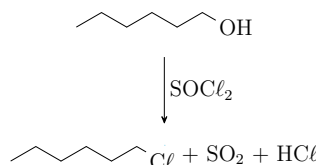
#### Exemple 1

Dans la réaction ci-dessous, les atomes se réarrangent au sein de la molécule : il ne se forme aucun sous-produit. L'économie d'atome est alors maximale (UA=1).



#### Exemple 2

Lors d'une réaction de substitution, comme la chloration d'un alcool primaire par le chlorure de thionyle, il se forme deux sous-produits :



L'économie d'atome réalisée est :

$$UA = \frac{M(\text{1-chlorohexane})}{M(\text{hexan-1-ol}) + M(\text{SO}_2) + M(\text{HCl})}$$

$$UA = \frac{121}{102 + 64 + 36,5} = 60 \%$$

#### Définition

L'économie d'atome permet de réaliser, à moindre coût énergétique et environnemental, l'**incorporation** de **groupes** (19) d'atomes **caractéristiques** (20) dans les produits recherchés.

Dans ce but, on privilégiera certaines réactions. Par exemple, les réactions d'addition permettent de réaliser une économie d'atome supérieure à celle des réactions d'élimination ou de substitution.

### 4.2 Choisir le solvant

#### Principe

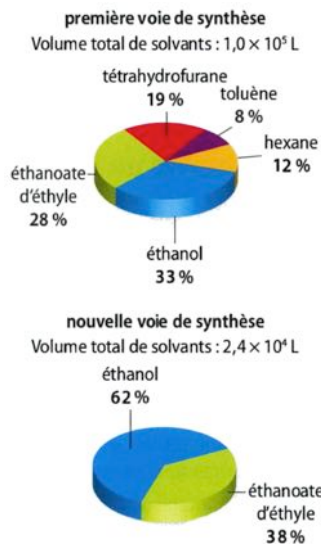
Sélectionner les solvants les **moins nocifs** (21) et en **réduire les quantités** (22) permet de diminuer leur impact sur les opérateurs et sur l'environnement.

Lors d'une synthèse dite « **monotope** » (un seul « pot »), un réactif subit plusieurs réactions dans un *même milieu réactionnel*, ce qui évite les processus de séparation et de purification, coûteux en solvants organiques.

Pour les mêmes raisons, la chimie industrielle développe l'usage de *solvants facilement séparables* comme les fluides supercritiques, aux propriétés intermédiaires entre celles des gaz et des liquides, de solvants non volatils, comme les liquides ioniques, ou de solvants verts, constitués d'un cation organique et d'un anion minéral.

### Exemple

Les figures ci-dessous comparent les utilisations de solvant dans la synthèse d'une tonne d'hypochlorite de sertraline, un antidépresseur.



## 4.3 Économiser l'énergie

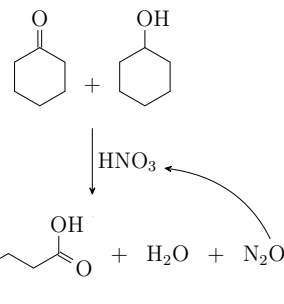
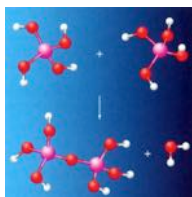
- L'emploi d'un **catalyseur** (23) accélère la réaction et *améliore son rendement* en l'orientant vers un produit spécifique. Il diminue l'énergie nécessaire à l'activation de la réaction.
- Les **biocatalyseurs** présentent un intérêt supplémentaire du fait de leurs conditions d'utilisation particulièrement **douces** (24), car ils nécessitent, à température ambiante, un pH neutre et un milieu aqueux.

### Définition

La **chimie douce** (25) propose des voies de synthèse économes en énergie, se réalisant dans des conditions proches des conditions naturelles de température et de pression.

### Exemple

Le « procédé sol-gel », *inspiré du vivant*, produit du verre par un procédé original qui consiste en une polymérisation du monomère  $\text{Si}(\text{OH})_4$  en solution aqueuse, à une température comprise entre  $20^\circ\text{C}$  et  $150^\circ\text{C}$ .



## 5.3 Valoriser le dioxyde de carbone

Il existe à ce jour trois manières de *valoriser* le dioxyde de carbone :

- l'utilisation sans transformation en tant que fluides réfrigérants, comme additif dans les eaux gazeuses ou pour produire du café décaféiné ;
- La transformation chimique, par exemple en carbonates introduits ensuite dans des matériaux de

construction. Cependant, la transformation chimique du dioxyde de carbone nécessite souvent beaucoup d'énergie ;

- La transformation biologique comme dans le cas de la culture de microalgues pour la production de biocarburant.

## 5.4 Conclusion

- L'économie d'atome, la diminution du nombre d'étapes lors d'une synthèse et le recours à d'autres solvants que les solvants organiques usuels permettent de réduire la formation de sous-produits indésirables ;
- L'utilisation de catalyseurs et la réalisation de réactions à température et pression usuelles permettent d'économiser l'énergie et de temps ;
- L'utilisation de biomolécules et la valorisation du dioxyde de carbone anthropique (= dû à l'homme) limitent l'impact du carbone sur l'environnement ;
- La limitation des déchets et le recyclage des sous-produits de synthèse sont des axes essentiels de la chimie durable.

# 5 Vers une chimie durable

## 5.1 Utiliser les agroressources

Les biomolécules sont extraites de ressources renouvelables comme les productions agricoles et, de façon générale, les végétaux, qui constituent les agroressources.

### Principe

Issues de la **biomasse** (26), les biomolécules sont utilisées dans les domaines énergétiques (biodiesel, biogaz...) et non énergétiques (synthèse de polymères, solvants, chimie fine...).

Les biomolécules présentent un avantage non négligeable : leur dégradation ne contribue pas à l'augmentation de l'effet de serre. Le  $\text{CO}_2$  rejeté dans l'atmosphère correspond à celui capté lors de la photosynthèse au sein d'un végétal.

## 5.2 Économiser la matière en la recyclant

La minimisation et le **recyclage** (27) des réactifs non consommés et des sous-produits indésirables sont des axes essentiels de la chimie durable.

La régénération par distillation des solvants toxiques et volatils usagés ou leur valorisation énergétique participe à cette chimie durable.

### Exemple

La synthèse de l'acide adipique, précurseur du nylon (6,6), s'accompagne de la formation de protoxyde d'azote  $\text{NO}_2$ , gaz à effet de serre. Son recyclage conduit à la production d'un intermédiaire de cette synthèse, l'acide nitrique  $\text{HNO}_3$ .

### Principe fondateur de la chimie verte

La **chimie verte** se propose d'agir sur **cinq domaines** : les **matières premières**, les **solvants**, l'**énergie**, les **déchets** et le **produit fini**.

Les **12 principes fondateurs** de la chimie verte ont été définis en 1998 par les chimistes américains Paul ANASTAS et John WARNER, et sont résumés par la très célèbre figure ci-dessus, qui se doit de figurer en poster dans tout laboratoire digne de ce nom (imprimé avec de l'encre à solvants aqueux, sur du papier recyclé).



Activités 1 à 7 pages 426 à 437