

# Le recyclage des matériaux : Enjeux et stratégie – procédés chimiques et bioprocédés

*Jacques Amouroux, professeur DC émérite, DHC – École nationale supérieure de Chimie de Paris/PSL – Université Pierre et Marie Curie/Sorbonne Université*

## Introduction

Cette présentation souligne quelques problèmes posés par le recyclage des matériaux et essaye de faire une distinction entre les procédés de recyclage par les voies de génie chimique et les bioprocédés<sup>1</sup> qui apparaissent comme un enjeu stratégique. Et pour ce faire, je rappelle le propos de Lavoisier : « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme. »

1. Mises en application de systèmes vivants (cellules ou leurs composants) pour provoquer des changements physiques ou chimiques.

À cette occasion, je voudrais rendre un hommage à Pierre Potier, qui fut Président de la Fondation de la Maison de la Chimie.

Ce grand scientifique, directeur de l'Institut des substances naturelles de Gif-sur-Yvette, Docteur en Pharmacie et Docteur ès Sciences, avait le sens des savoirs ancestraux et savait dire :

• « **Nos solutions sont dans la nature, il convient de savoir les voir.** » À ce titre, il a découvert l'anticancéreux, le taxotère, à partir de l'extraction de la substance des feuilles des ifs des jardins du laboratoire du CNRS de Gif-sur-Yvette dont il a modifié les propriétés par synthèse

organique pour développer un médicament extraordinaire commercialisé par la société Rhône-Poulenc et le CNRS.

• Ses conseils étaient :  
**« Émerveillez-vous et construisez votre passion. »**

Je souhaite reprendre sa démarche dans cet article, en me limitant à deux types de recyclages liés à la transition énergétique : d'une part les procédés de recyclage technique dans les cas des batteries et du photovoltaïque<sup>2</sup>, et d'autre part les bioprocédés appliqués au recyclage du gaz carbonique et des lanthanides.

## 1 De l'innovation à la déconstruction : les défis de la transition énergétique, les ressources et le recyclage

L'être humain, depuis sa naissance jusqu'au moment où il atteint sa pleine maturité,

2. Conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

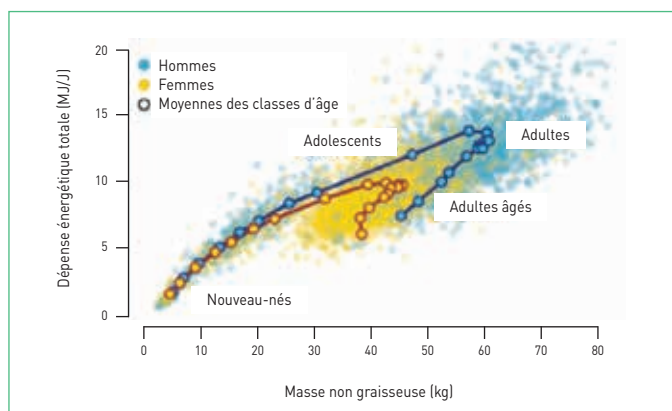


Figure 1

Consommation énergétique d'un humain en MJ/jour en fonction de son poids en kg (d'après Science mag.org 13 august 2021. Vol 373 issue 6556 p. 809).

consomme de quelques mégajoules à 15 mégajoules par jour (Figure 1).

Cette consommation est une obligation pour vivre, un peu différente en fonction de l'âge et du sexe. Lorsque l'on examine l'évolution de la courbe de la démographie mondiale (Figure 2, à gauche), on constate que nous sommes passés de moins d'un milliard d'êtres humains pour atteindre aujourd'hui 8 milliards, et nous nous dirigeons vers les 10 milliards.

Il est impératif de nourrir ces 8 milliards d'êtres humains, et de leur fournir l'énergie nécessaire comme on peut le voir sur la courbe de l'évolution de la consommation énergétique mondiale (Figure 2).

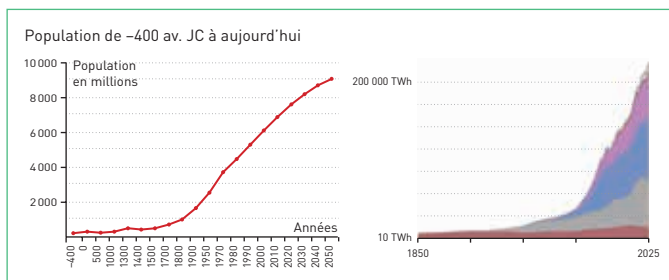
La révolution industrielle du charbon en Angleterre en 1850 a été la première étape, puis, en 1900, le pétrole du Texas est arrivé, puis le gaz.

Les énergies renouvelables décarbonées<sup>3</sup> sont encore aujourd'hui tout à fait minoritaires (Figure 3). Vis-à-vis de la consommation mondiale globale de 200 000 TWh par an. Pour mieux comprendre ce que représente le térawatt-heure (TWh), il faut savoir qu'un pétrolier de 350 000 tonnes représente 4 TWh, et qu'une centrale nucléaire de 900 mégawatts génère 8 TWh/an. On comprend le défi auquel nous sommes confrontés lorsqu'il s'agit de remplacer les 82 % d'énergies fossiles par des énergies dites décarbonées, que ce soit le nucléaire, l'hydraulique, l'éolien ou le solaire, qui ne

3. Une énergie dite décarbonée ne produit pas de dioxyde de carbone lors de son utilisation.

représentent aujourd’hui que 17 % au total (**Figure 3**). **Malgré le développement du solaire et de l’éolien, ces deux énergies décarbonées, dont on parle beaucoup, n’ont pas un impact majeur (4 %) sur la consommation mondiale.**

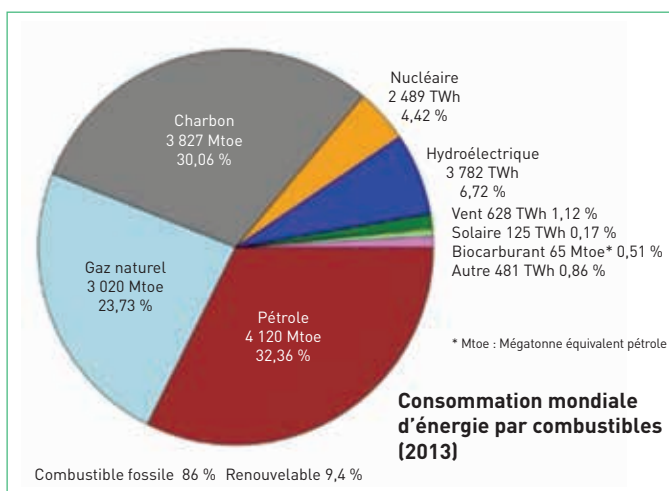
**Mais il ne faut pas oublier que le talon d’Achille de notre société est l’eau.** La consommation mondiale est de 4 milliards de tonnes par an. Cette eau, pour 70 %, est la clé d’entrée pour pouvoir assurer une agriculture qui nous fournit la nourriture,



**Figure 2**

Mise en perspective de l’évolution de la consommation énergétique mondiale et celle de la démographie mondiale. À gauche : démographie mondiale de -400 à aujourd’hui. À droite : évolution de la consommation énergétique de 1850 à 2025.

Source : Nations unies, L’Internaute



**Figure 3**

Répartition de la consommation mondiale d’énergie par type de combustibles en 2019. À noter que, en 2022, il y a eu 82 % de « combustibles fossiles » et 17,3 % d’« énergies renouvelables ».

22 % sont consommés pour l'industrie et 8 % pour les besoins domestiques. Nous sommes donc confrontés à une véritable problématique, à savoir **le recyclage de l'eau**, bien que cela ne soit pas l'objet de cet article, cela sera implicite dans un bon nombre de cas.

### 1.1. La transition énergétique et les consommations de matériaux

Si nous regardons les innovations développées par notre société au cours des dernières années, nous constatons que le matériau le plus utilisé est le fer (**Figure 4**) avec 3 milliards de tonnes par an. Ensuite, viennent les métaux

industriels avec l'aluminium, le manganèse, le chrome, le cuivre, le nickel... La consommation de ces matériaux, qui sont indispensables à la voiture électrique, sera multipliée par un facteur de 2, 3 ou 4, voire dix (lithium), dans les prochaines années.

Les métaux dits stratégiques qui sont indispensables, à la fois pour les téléphones portables, la microélectronique, les big data, etc. sont représentés **Figure 5** : 1,3 milliard de tonnes ont été extraits en 2019 comprenant l'étain, le molybdène, le cobalt, le tungstène, l'indium, le vanadium, le niobium, le tantale, l'or, le platine, le gadolinium et le fameux lithium.



**Figure 4**  
Ensemble des métaux extraits en 2019 dans le monde (d'après British Geological Survey, 2019 ; USGS Mineral Commodity Summaries, 2021).

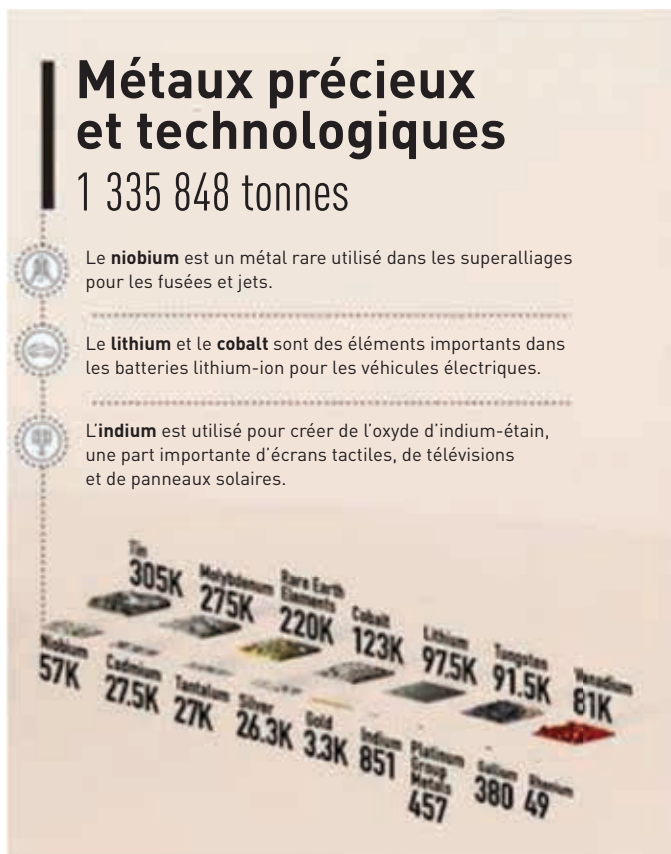


Figure 5

Matériaux stratégiques extraits en tonnes en 2019 dans le monde (d'après British Geological Survey, 2019 ; USGS Mineral Commodity Summaries, 2021).

**Cette extraction minière requiert 6 % de l'énergie mondiale pour être réalisée.**

## 1.2. Les procédés classiques de recyclage

Recycler les matériaux apparaît donc comme une obligation, d'une part pour des raisons environnementales, d'autre part pour des raisons stratégiques et logistiques, ainsi que pour l'énergie nécessaire pour les produire. Et enfin, rappelons encore qu'il

faut prendre en compte l'eau, qui est indispensable à toute activité humaine.

Si nous regardons le cas du **recyclage de l'acier** : on en fabrique actuellement 1,7 milliard de tonnes par an à la sortie des hauts-fourneaux. Pourtant les ferrailles recyclées ne représentent que 600 millions de tonnes, soit seulement 36 % de recyclage, alors même que c'est le matériau le plus facile à recycler. Nous sommes donc loin du compte pour parvenir à recycler l'ensemble de l'acier.

Pourtant, la nature sait recycler et nous aide, comme le montre l'exemple de l'épave du *Titanic*, située à 3 500 mètres de profondeur, en train d'être recyclée par une bactérie nommée *Holomonas Titanicae* (Figure 6), qui dévore 500 tonnes d'acier par an. Nous aborderons plus loin cette partie des bioprocédés qui semble être une stratégie future déterminante pour l'ensemble des activités industrielles et humaines.

### 1.3. Le recyclage des batteries : le défi des années futures pour l'Europe

#### A. Les batteries Li-ion

Analysons maintenant le problème des batteries. La batterie d'un véhicule électrique

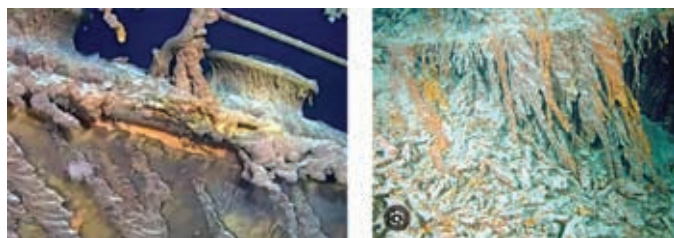


Figure 6

Recyclage du *Titanic* par la bactérie *Holomonas Titanicae*.

Sources : à gauche, d'après une vidéo diffusée par Atlantic Productions (Atlantic Productions via The Associated Press) ; à droite, d'après Wikipedia (Mann, Kaur, Sánchez-Porro & Ventosa 2010)



Figure 7

Piles élémentaires de batterie de véhicule électrique.

n'a rien à voir avec celle d'un véhicule thermique. Il s'agit d'une série de piles (Figure 7), regroupées pour former ce que l'on appelle une batterie électrique. Dans une voiture comme la Tesla, on compte 7 000 de ces petites batteries, gérées et coordonnées par une électronique que l'on voit sur la partie inférieure (Figure 8). Intéressons-nous uniquement au recyclage de ces batteries, et pas à l'électronique, pourtant essentielle pour les charger et les décharger de manière simultanée, faute de quoi il y aurait un risque d'incendie.

Au niveau mondial, ces batteries représenteront 250 000 tonnes à recycler d'ici 2030. Les techniques qui seront utilisées sont quelque peu brutales, mais classiques. Après avoir déchargé ces batteries, on les broiera. Cela donnera un mélange appelé la « *black mass*<sup>4</sup> », et ce mélange, ainsi que l'ensemble de ses ingrédients, sera traité par l'hydrométallurgie<sup>5</sup> classique du génie chimique, avec des solutions acide-base, l'extraction liquide-liquide, les phénomènes de précipitation et l'électrolyse<sup>6</sup>, pour récupérer le nickel, le lithium et le manganèse, qui sont les trois éléments les plus valorisés et les plus coûteux dans ces matériaux. Si l'on examine la composition d'une batterie Li-ion (Figure 9), 22 % de son poids correspond à

4. Masse noire.

5. Ensemble des procédés et des techniques d'extraction des métaux contenus dans un matériau brut ou concentré, par dissolution dans une phase liquide.

6. Décomposition par le passage d'un courant électrique.

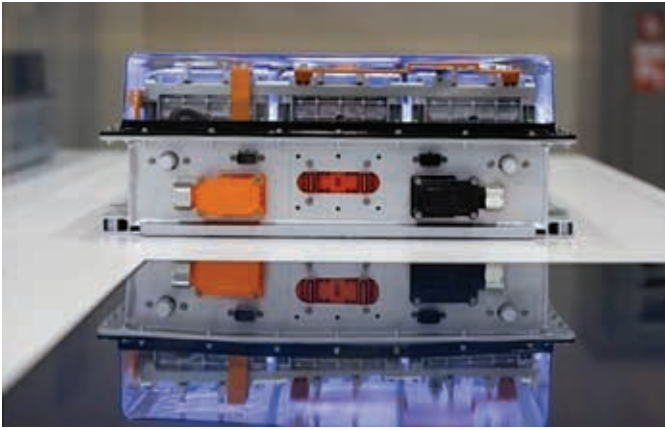


Figure 8

Batterie électrique de la marque CATL (Technologie Amperex contemporaine)

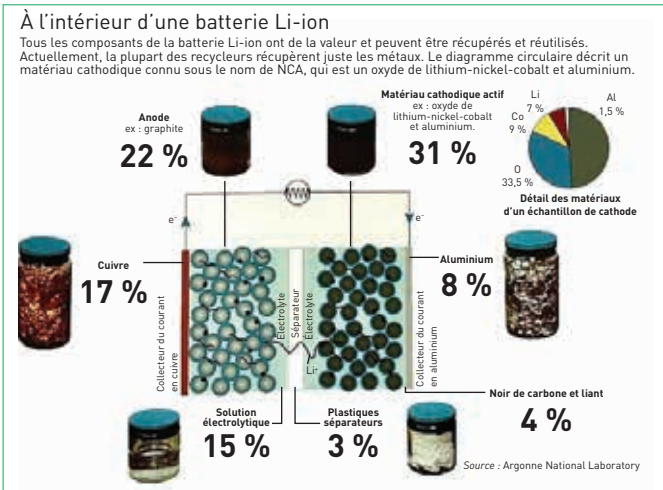


Figure 9

Composition d'une batterie lithium-ion (d'après Argonne National Laboratory).

l'anode<sup>7</sup>, 31 % à la cathode<sup>8</sup>. L'électrode<sup>9</sup> proprement dite de la cathode est en l'aluminium

7. L'anode constitue l'électrode où la réaction d'oxydation a lieu. L'oxydation est une perte d'électrons.

8. La cathode constitue l'électrode où la réaction de réduction a lieu. La réduction est un gain d'électrons.

9. Conducteur libérant ou captant le courant électrique.

et représente 8 % du poids ; l'anode est en cuivre et pour 17 % du poids ; l'électrolyte<sup>10</sup>, qui est un lithium-fer-phosphate, représente 15 % en masse. On rajoute sur le compartiment cathodique les granules de graphite pour éviter

10. Capable de transporter le courant électrique.

les formations dendritiques au moment du rechargement et, entre les 2 compartiments, il y a une barrière polymérique pour éviter le mélange des gels. On pourrait imaginer que ces batteries étant connues, on puisse les recycler simplement. Mais tous ces produits sont en cours d'amélioration : vitesse de chargement, capacité de chargement, durabilité, etc., c'est-à-dire qu'en permanence, qui dit amélioration, dit modification des compositions, donc modification des stratégies de recyclage, ce qui explique donc la complexité à laquelle nous sommes parvenus (Figure 10).

### La gestion du lithium

Concentrons-nous sur le cas du lithium qui est un matériau stratégique dans le cas des batteries.

En effet, pour produire une tonne de lithium, il faut 250 tonnes de minerai ou 750 tonnes de saumure. Pour traiter 750 tonnes de saumure, il faut 2 000 tonnes d'eau dans les salars du Chili.

À cela il faut ajouter que, pour 1 kWh de batterie, on émet 42 kilos de CO<sub>2</sub>, ce qui signifie que nous ne sommes jamais neutres en carbone, quel que soit le type d'activités.

La Figure 11 montre un salar du Chili : c'est un gigantesque marais salin où l'évaporation va faire apparaître le carbonate de lithium.

Regardons maintenant l'évolution des masses de matériaux à recycler (Figure 12) et la masse des matériaux à recycler en 2028 pour 2 000 GWh (Figure 13).

LiB cathode chemistries

Idéal      Faible






Types de cathode	LCO	LFP	LMO	NCA	NMC
Formule chimique	LiCoO <sub>2</sub>	LiFePO <sub>4</sub>	LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Li(Ni,CoAl)O <sub>2</sub>	LiNi <sub>0,33</sub> Mn <sub>0,33</sub> Co <sub>0,33</sub> O <sub>2</sub> (NMC111) LiNi <sub>0,8</sub> Mn <sub>0,15</sub> Co <sub>0,05</sub> O <sub>2</sub> (NMC532) LiNi <sub>0,8</sub> Mn <sub>0,15</sub> Co <sub>0,05</sub> O <sub>2</sub> (NMC622) LiNi <sub>0,8</sub> Mn <sub>0,1</sub> Co <sub>0,1</sub> O <sub>2</sub> (NMC811)
Structure	Layered 	Olivine 	Spined 	Layered 	Layered 
Année d'introduction	1991	1990	1996	1999	2008
Sûreté	..	.....	....	...	...
Densité d'énergie	....	...	...	.....	.....
Densité de puissance	...	....	....	....	...
Durée de vie du calendrier	...	....	....	....	....
Durée de vie du cycle	....	....	...	....	...
Performance	....	....	...	....	....
Coût	.	....	....	...	...
Part de marché	Obsolète	Vélos électriques, bus et véhicules lourds	Petit	Stable	En croissance

Figure 10

Évolution des cathodes de plus en plus complexes. Désassemblage à modifier à chaque génération.





Figure 11

Salar du Chili au désert d'Acatama [Image extraite d'un reportage vidéo sur le lithium : L'or blanc du Chili, du Journal de TF1 du 25 janvier 2022].

#### **En 2017**

Un million de véhicules électriques soit 154 MWh de batteries

#### **En 2028**

Environ 28 millions soit 2 000 GWh de batteries  
 Dans dix ans on aura **250 000 tonnes** de déchets

(Nature 2019, DOI: 10.1038/s41586-019-1682-5)

Figure 12

Évolution des masses de batteries à recycler dans les dix ans à venir.

#### **Cas des batteries de 435 kg ou 87 KWh**

**Li :**  $1,4 \times 10^5$  T ou 140 000 tonnes

**Co :**  $4 \times 10^5$  T

**Cu :**  $5,7 \times 10^5$  T

**Mn :**  $8,8 \times 10^5$  T

**Al :**  $4,3 \times 10^5$  T

**Ni :**  $2,4 \times 10^5$  T

**Steel :**  $22,4 \times 10^5$  T

**Graphite :**  $24,5 \times 10^5$  T

**Émission de CO<sub>2</sub> :** ( 42 kg/kwh ) × 2 000 GWh = **84 millions tonnes de CO<sub>2</sub>**

(dec 9/16 2019 CEN.ACS.ORG.- C8EN p 21)

Figure 13

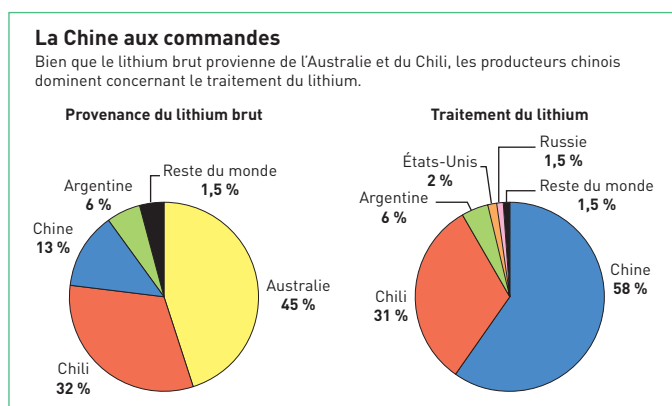
Masse de matériaux à recycler en 2028 pour 2 000 GWh de batteries.

De nombreux problèmes vont être à résoudre.

**En 2028, dans le cas des batteries classiques de 435 kg et de 87 kWh, le recyclage de 2 000 GWh de batteries générera des masses de matériaux à recycler considérables** : 140 000 tonnes de lithium, 400 000 tonnes de cobalt, 570 000 tonnes de cuivre, 880 000 tonnes de manganèse, 400 000 tonnes d'aluminium, 200 000 tonnes de nickel, 2 milliards de tonnes d'acier et 2 milliards de tonnes de graphite.

De plus, lors de leur utilisation, on ne peut pas décharger ce type de batterie à moins de 20 % ni les charger à plus de 80 % de manière classique. Ainsi, nous ne disposons que d'environ 60 % de 87 kWh, soit environ 50 kWh utiles pour faire fonctionner chaque véhicule électrique.

Si nous examinons l'aspect financier et industriel de l'origine de ce lithium (*Figure 14*),



**Figure 14**

Le lithium, aspect financier et industriel : diagramme circulaire de la provenance du lithium brut et de la localisation du traitement du lithium (d'après Benchmark Mineral Intelligence).

géopolitiquement, l'Australie et le Chili produisent actuellement 80 % du lithium brut. La Chine en produit très peu, mais domine le traitement de ce matériau pour produire l'électrolyte lithium-fer-phosphate qui provient à 58 % de Chine et à 31 % du Chili. Donc, 90 % du matériau de base qui permet de créer une batterie provient encore de l'extérieur de notre continent européen, qui tarde toujours à trouver des solutions pour l'avenir.

Il faut aujourd'hui 33 kg de lithium par véhicule électrique, mais d'ici à 2030, il faut prévoir une augmentation de 400 % de la demande globale de batteries. Or, en 2012, le lithium valait 5 000 dollars la tonne alors que maintenant, en 2023, il atteint 50 000 dollars la tonne.

### *B. Le stockage d'une grande quantité d'électricité est un véritable enjeu géopolitique*

La plus grande batterie, fabriquée par BASF, est une batterie sodium-soufre de 5,8 MWh, qui a un volume de 125 m<sup>3</sup> (*Figure 15*), à comparer avec 125 m<sup>3</sup> de fioul qui permettent de stocker 1 375 MWh. On voit ainsi que la compétition du stockage de l'énergie entre carbone et batterie reste un défi pour nos sociétés.

Cependant, en développant le photovoltaïque et l'éolien, nous produisons des électrons. Il est nécessaire de stocker ces électrons pour les rendre disponibles aux heures de pointe. Nous allons assister à des développements comme celui de la *Figure 15* où des batteries de grande capacité seront utilisées pour stocker l'énergie pendant les heures creuses et



Figure 15

Batterie BASF sodium-soufre.



Figure 16

Allée de batteries de grande capacité.

la restituer pendant les heures de pointe afin de stabiliser le réseau.

Le recyclage de ces batteries dans les 10 ans à venir est un véritable défi pour l'Europe.

En France, l'objectif est de 200 000 batteries par an et les filières de recyclage sont représentées sur la **Figure 17**.

L'Europe a engagé la bataille du recyclage avec des acteurs importants comme :

- BASF qui prévoit une usine de 15 000 tonnes par an et le recyclage de la *black mass* ;
- Northvolt en Norvège qui a un projet de 12 000 tonnes par an.

Les prévisions à l'horizon de 2030 sont de 350 000 tonnes

**Projet Veckor, Prologium et Orano et du Chinois XTC** pour la production et le recyclage des cathodes à Domielle (Hauts-de-France).

**Eramet et Suez** ont développé une installation pilote à Trappes et ont mis en chantier pour 2025, dans les Hauts-de-France, une unité de production de *black mass* qui contient les métaux des batteries et en 2027 une unité de retraitement par hydrométallurgie de la *black mass* pour récupérer le nickel, le lithium, et le manganèse.

**Objectif affiché : 200 000 batteries par an pour 65 % de recyclage**

Figure 17

Filières de recyclage en France et en Europe.

par an de matériaux issus de batteries Li-ion à recycler.

#### 1.4. Le recyclage des panneaux photovoltaïques

Examinons maintenant le problème des panneaux photovoltaïques. Le photovoltaïque est une énergie produite à 95 % grâce au silicium ultra-pur capable de transformer l'énergie photonique<sup>11</sup> en électrons, permettant ainsi d'obtenir un flux d'électrons en sortie des photopiles<sup>12</sup> et des panneaux. **Cependant, la production de silicium photovoltaïque nécessite 300 kWh par kilo.**

Un panneau photovoltaïque standard pèse 20 kg, pour une capacité de 300 watt-crêtes (Wc)<sup>13</sup>. Il a un facteur de charge de 15 %, c'est-à-dire qu'il produit 45 W en valeur moyenne sur l'année, sa production électrique annuelle variant selon que vous êtes dans le Nord ou dans le Sud, entre 270 et 420 kWh/an, ou en production journalière entre 740 et 1 150 Wh. **Pour charger quotidiennement une voiture électrique, il faudra au moins une vingtaine de panneaux.**

Actuellement, on installe quelque 60 millions de tonnes de panneaux photovoltaïques dans le monde (*Figure 18*).

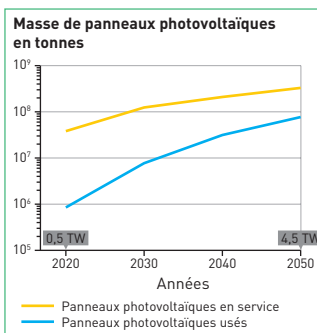


Figure 18

Prévision de développement de la production de panneaux photovoltaïques et de la masse de panneaux à recycler (d'après Nat. Energy 2020, DOI: 10.1038/s41560-020-0645-2).

On prévoit d'atteindre les 500 millions de tonnes. La courbe en bleu qui est en bas de la *Figure 18* concerne les prévisions de recyclage, la durée de vie des panneaux étant de l'ordre de 25 ans. Actuellement, nous sommes aux environs de quelques millions de tonnes à recycler.

#### Stratégie de la déconstruction et du recyclage des panneaux photovoltaïques

Le stockage des panneaux usés est un problème. Quand on ne sait pas quoi en faire, on les empile (*Figure 19*).

Pour analyser le problème de la déconstruction, rappelons les bases de la construction. Le silicium métallurgique est l'élément de base, produit par électroréduction en four à arc<sup>14</sup>. Il coûte à peu près 4 dollars le kilo. Le silicium photovoltaïque a une pureté de 6N ou 8N, ce qui signifie que c'est un matériau qui a un atome étranger pour 1 milliard d'atomes de silicium, ce qui traduit sa pureté tout à fait exceptionnelle, mais il coûte 32 dollars au kilo. Le silicium photovoltaïque s'est développé au niveau européen, en Allemagne en particulier qui a été leader du domaine dans les années 2000. Actuellement, le marché est dominé par la Chine (*Figure 20*) qui fabrique 98 % des pavés de silicium.

La *Figure 21* présente une unité de distillation du trichlorosilane qui montre l'unité de distillation qui est derrière l'élaboration de ce produit ultra pur par un procédé développé par la société Wacker,

11. Énergie qui provient des photons *i.e.* de la lumière, en particulier celle du soleil.

12. Dispositif utilisant l'effet photovoltaïque pour convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique.

13. Unité de mesure utilisée pour mesurer la puissance maximale qu'un panneau photovoltaïque peut fournir dans des conditions idéales. En outre, 1 watt-crête correspond à 1 Wh dans les conditions idéales.

14. Qui est produit par l'énergie électrique.



Figure 19

Stockage des panneaux photovoltaïques usés (d'après ACS, mai 2022).

leader dans les années 2000, avant qu'elle ne disparaisse en 2010, complètement dévorée par la démarche chinoise.

Les différentes étapes du procédé sont résumées sur la **Figure 22**. Le silicium à 99 % est dissous dans l'acide chlorhydrique à 300 °C, puis est distillé sous forme de trichlorosilane à 250 °C, il est ensuite craqué à 1 200 °C (sur la partie droite), sur des épingles thermiques, pour donner un silicium microcristallin ultrapur.

Si nous reprenons la chaîne logistique de fabrication (**Figure 23**), puisque c'est



Figure 20

Proportion du marché des photovoltaïques dominé par la Chine (d'après BNEF).



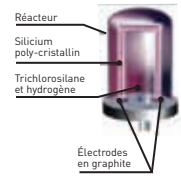
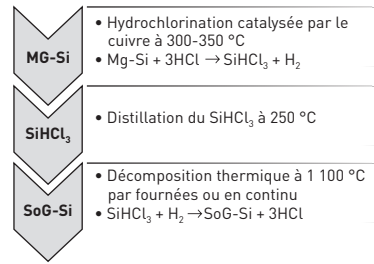
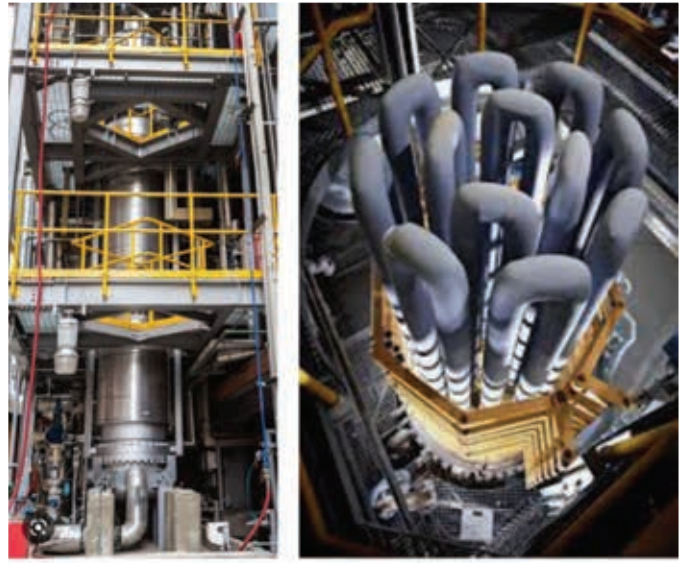
Wacker Chemie utilise des tours de distillation pour enlever les impuretés du trichlorosilane, qui est utilisé pour produire du polysilicone.

Figure 21

Unités de distillation du trichlorosilane par le procédé Wacker (d'après CEN.ACS.org september19.2022 p. 22).

celle que nous allons devoir déconstruire, on part donc d'abord du silicium ultrapur, on en fait un lingot (étape 2). Ce lingot est découpé pour faire des « wafers » qui vont avoir une épaisseur de l'ordre de 100 microns<sup>15</sup>. Ces tranches de silicium sont dopées au phosphore (étape 3) pour faire la diode. Sur cette diode, on va apporter des électrodes en argent. Ces électrodes vont être assemblées pour faire des guirlandes, et ces guirlandes vont être ensuite encapsulées

15. 1 micron = 1 micromètre.



Dans le cas d'un réacteur de type Siemens, le dépôt a lieu sous cloche chauffée à 1 100-1 200 °C via des électrodes en graphite.

Figure 22

Procédé Wacker de distillation du  $\text{SiHCl}_3$  (d'après CEN.ACS.org september19.2022 p 22).

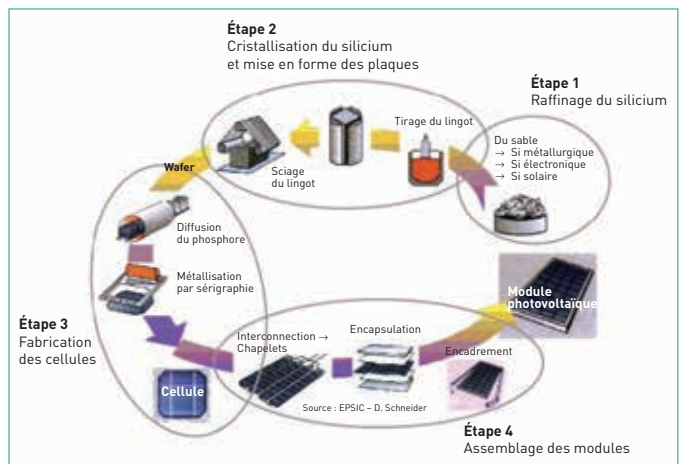


Figure 23

Étapes de fabrication d'un module photovoltaïque au silicium cristallin.

pour faire apparaître le panneau (étape 4).

Le problème du recyclage est celui posé par la séparation des couches d'encapsulation de la photovoltaïque parce qu'il y a 2 feuilles de polymère (Figure 24), l'EVA d'un côté et le tedlar de l'autre, qui sont d'une robustesse extraordinaire. Il n'y a pas la moindre fuite d'air, ce qui permet la durée de vie du panneau de l'ordre de 20 à 25 ans, faute de quoi on aurait des phénomènes de corrosion.

Pour dé-laminer cet ensemble, on utilise soit des solvants, avec tous les problèmes posés par leur utilisation, soit la proposition du CEA avec l'utilisation du CO<sub>2</sub> supercritique<sup>16</sup> qui attaque les 2 feuilles de polymère (Figure 25), comme le montre la boursoufflure, puis on récupère les photopiles.

Cela serait simple s'il n'y avait pas 80 millions de tonnes de panneaux à traiter. On comprend le défi auquel on est confronté, en sachant que le recyclage coûte entre 15 et 45 dollars le panneau selon les pays et selon les temps de transport pour les amener à l'usine correspondante. Dans l'hypothèse du simple stockage, cela ne coûte que 5 dollars le kilo.

**Le problème posé par ce recyclage est donc aussi un problème financier**, et la question est de savoir qui le paye ? Il faut faire un bilan financier de toutes les opérations pour aboutir à une industrie qui

paie l'ensemble de ceux qui agissent.

Du point de vue de la logistique, si l'on regarde la composition en masse des panneaux (Figure 26), 75 % du panneau est en verre, le polyéthylène

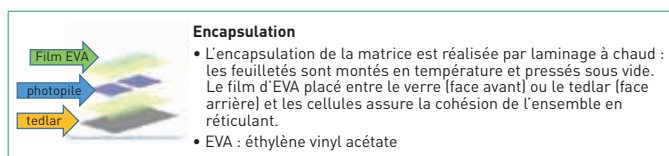


Figure 24

Principe d'encapsulation de la matrice ; au-dessus, la feuille d'EVA, au milieu la photopile et en dessous le tedlar.

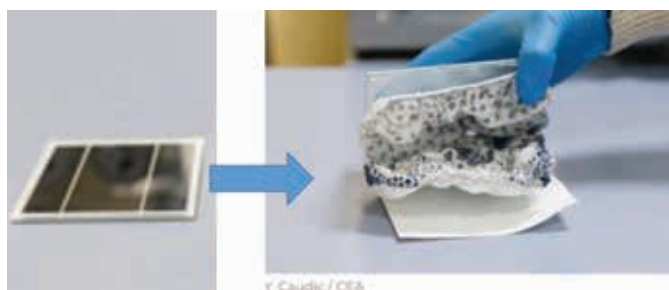


Figure 25

Recyclage des panneaux photovoltaïques grâce au CO<sub>2</sub> supercritique.

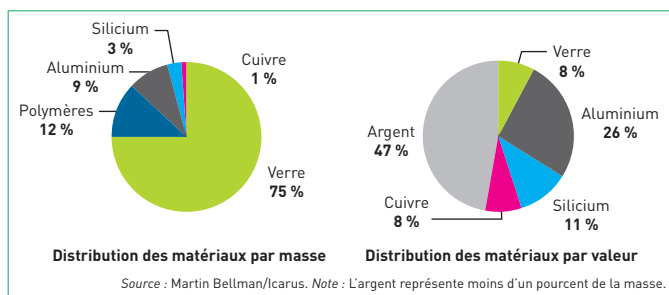


Figure 26

Matériaux dans une cellule photovoltaïque.

16. Un état supercritique est intermédiaire entre celui d'un gaz et d'un liquide : en outre, cela intervient à une température et une pression élevées.

représente 12 %, l'aluminium 9 %, le silicium 3 %, le cuivre 1 %. Mais si l'on considère la valeur financière des composants sur laquelle on va fonder un business model du recyclage, on constate que la connectique en argent représente 47 % de la valeur que l'on peut espérer récupérer, le cuivre 8 %, le silicium 11 %, l'aluminium du cadre du panneau 26 %, et le verre, qui a peu de valeur, 8 %. Donc voilà la contradiction dans la chaîne logistique que l'on va devoir construire entre la chaîne de manipulation et la chaîne financière.

Quand on fait le bilan du recyclage à prévoir en 2050, les tonnages sont monstrueux : 75 millions de tonnes de verre, mais les problèmes concernent surtout le cuivre, avec 1 million de tonnes, qui est un matériau en tension au niveau international, l'aluminium 9 millions de tonnes, 3 millions de tonnes pour le silicium. Donc ce sont de grands volumes et de grandes masses qu'il va falloir gérer pour pouvoir développer une unité industrielle.

Au niveau européen, un certain nombre de consortiums ont été montés, avec l'aide de la communauté européenne, pour déconstruire l'ensemble des panneaux. Mais on en est au balbutiement, et encore loin d'avoir atteint les points correspondant aux tonnages dont on a besoin.

## 2 Le rôle des procédés bactériens pour le recyclage

Rappelons-nous que l'eau et le carbone sont les deux molécules clés qui donnent la vie.

Ainsi, face au futur de notre société, la biodiversité dépend entièrement de ces deux molécules. Malgré son importance, le recyclage de l'eau ne sera pas traité : nous examinerons le cas du carbone. L'avantage des bioprocédés utilisant des bactéries réside dans le fait que ces procédés se déroulent à basse température, utilisent peu de réactifs toxiques, et peuvent employer différentes sources d'eau (douce, de mer, usée). L'énergie peut aussi provenir de diverses sources. Cependant, la source bactérienne est la clé d'entrée des bioprocédés, et elle doit être sélectionnée avec rigueur. Nous savons modifier les bactéries grâce aux organismes de modification génétique, tels que CRISPR-Cas9, sur lesquels la lauréate du prix Nobel Isabelle Charpentier a effectué sa thèse à l'université Pierre et Marie Curie. Ainsi, la modification bactérienne constitue la clé du futur de cette technologie du « bio-engineering » qui est, à mes yeux, l'avenir de nos sociétés industrielles.

### 2.1. Stratégies innovantes pour le recyclage du carbone et le contrôle de CO<sub>2</sub>

#### A. Dans la nature, le carbone est recyclé en méthane

Le problème du recyclage du carbone est devenu, au sens figuré, la bête noire de notre société.

Dans la nature, le charbon est un macro-polymère<sup>17</sup>, qui

17. Polymères : longues chaînes de molécules possédant une masse molaire élevée, se répétant avec un motif précis.

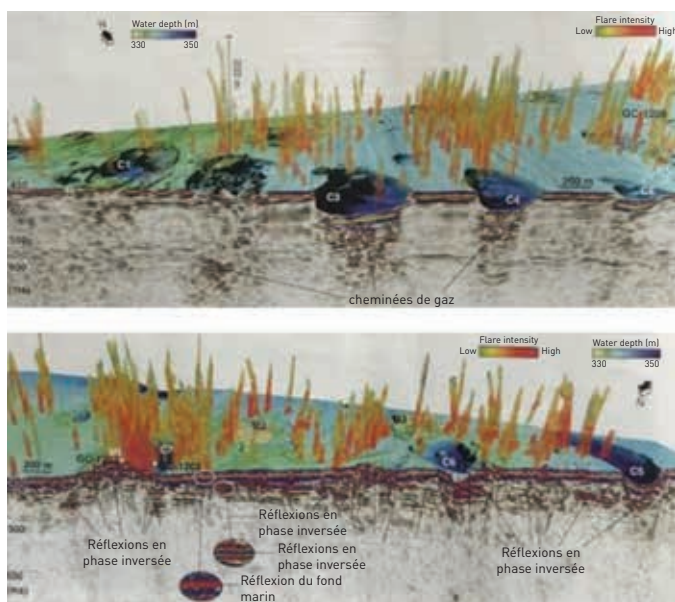


peut être découpé par des bactéries de type méthanogène<sup>18</sup> pour produire ce que l'on appelait autrefois le grisou, c'est-à-dire le méthane. **Nous disposons d'une réserve de 50 000 milliards de mètres cubes de méthane.** L'idée selon laquelle nous n'utilisons pas ce méthane me semble surprenante. Même si nous ne l'utilisons pas, les bactéries ne suivent ni les injonctions de la communauté européenne ni nos propres directives et elles continuent de travailler. Dans la mer de Barents (**Figure 27**), des lacs de méthane se forment, tout comme dans le lac Baïkal en Russie, provoquant des explosions régulières. Cela traduit le fait que, faute de l'avoir capté, le méthane s'échappe dans l'atmosphère, contribuant alors à l'effet de serre bien connu. C'est un point dans notre société, difficile à comprendre sur le plan scientifique.

Il y a aussi des explosions massives d'hydrates de méthane déposés sur les fonds marins arctiques qui sont visibles de l'espace, c'est dire leur importance.

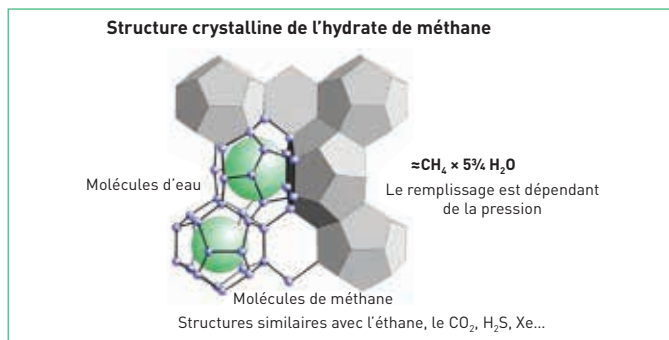
La structure cristalline d'un hydrate de méthane est représentée sur la **Figure 28**. Le couplage entre 5 molécules d'eau et 1 molécule de méthane forme un solide. Ce solide peut être exploité pour nous donner du méthane. **Là aussi, on dispose de réserves de quelques milliards de mètres cubes de méthane.**

18. Bactéries qui produisent du méthane au cours de leur métabolisme anaérobie *i.e.* sans oxygène.



**Figure 27**

Accumulation de méthane dans le lac de Barents (d'après Science, 2 juin 2017, p. 949, vol 356, issue 6341).



**Figure 28**

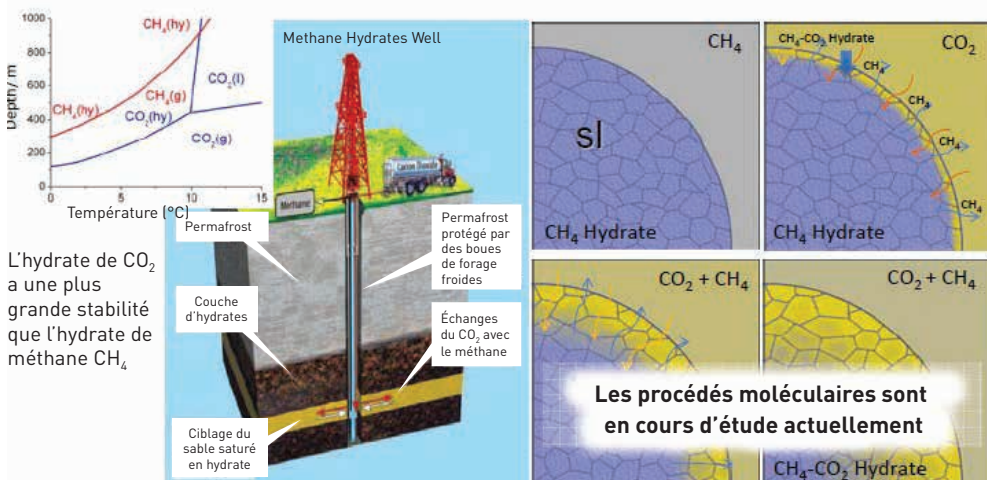
Structure cristalline solide du méthane hydraté.

La société japonaise Mitsui avait débuté l'exploitation de ces hydrates de méthane pour récupérer le méthane et faire tourner ses turbines à gaz (**Figure 29**).

Bien que la France ait fermé toute la filière charbon en

### Stockage alternatif : l'échange $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ dans les hydrates gazeux

Échange  $\text{CO}_2\text{-CH}_4$  dans les sédiments poreux, c'est-à-dire dépendant de la taille des grains



Observation : le  $\text{CO}_2$  est déjà utilisé pour améliorer la récupération de sources hydrocarbonées conventionnelles. Le remplacement du  $\text{CH}_4$  dans les hydrates gazeux est en cours d'étude.

Figure 29

Extraction des hydrates de méthane par la société Mitsui.

1983, les bactéries présentes dans les galeries de charbon continuent de travailler. *Methermicoccus*<sup>19</sup> continue de décomposer les nappes de charbon, et à Béthune, la société des houillères du Nord a développé un système étanche pour coiffer l'ensemble de ces puits, permettant de récupérer le méthane et de fournir une autonomie énergétique à la commune de Béthune depuis 2021 (Figure 30).

Ce secteur de l'exploitation du méthane est en pleine effervescence, explorant la possibilité de produire directement du méthane par le couplage  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  et l'électrolyse, comme le suggèrent les équipes de Stanford. On trouve également des approches avec les cyanobactéries, qui sont génétiquement modifiées pour produire

des alcools, entre autres. C'est un secteur de recherche en évolution extraordinaire qui ferait du  $\text{CO}_2$  une matière première plutôt qu'un déchet. Cela modifie complètement les stratégies que nous pouvons envisager à court terme.

#### *B. Rôle des cyanobactéries pour la dépollution des hydrocarbures*

Les cyanobactéries ont la capacité de dégrader les hydrocarbures à la surface des océans, y compris ceux que nous utilisons pour nous protéger du soleil sous forme de crème. Les bactéries sont donc des outils pour dépolluer les océans (Figure 31).

Selon le MIT, les cyanobactéries produisent aussi 800 millions de tonnes d'hydrocarbures par an. Ainsi, le cycle du carbone, qui est le cycle de la vie, doit être révisité, étudié et encouragé du point de vue scientifique et

19. Micro-organisme de la famille des Méthanosarcinales.

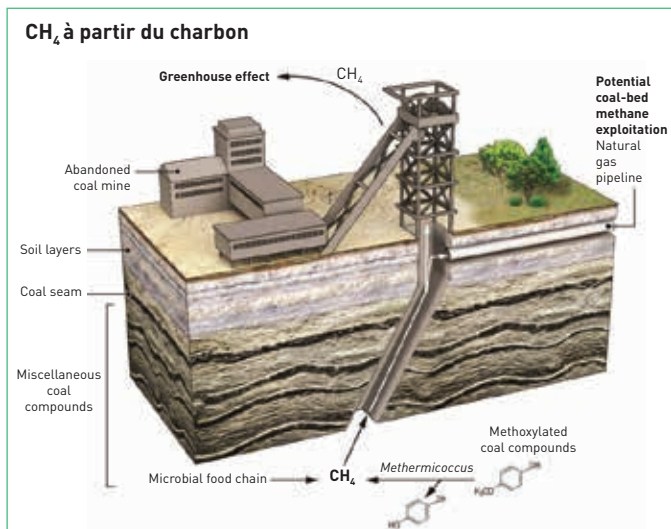


Figure 30

Production de méthane  $CH_4$  à partir du charbon.

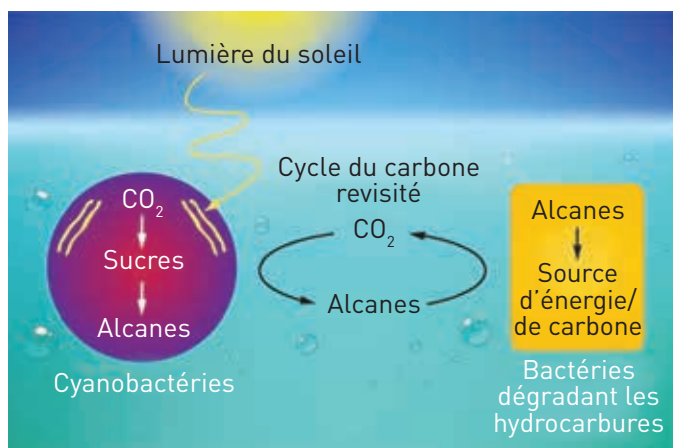


Figure 31

Les cyanobactéries peuvent dégrader les hydrocarbures : le cycle du  $CO_2$  revisité.

politique, pour une compréhension autre que « le  $CO_2$  est un toxique ».

### C. Recyclage du $CO_2$ par les microalgues

La deuxième espèce intéressante à considérer est les microalgues. Rappelons que nous devons nourrir

l'ensemble des poissons, car la pisciculture représente les deux tiers de la consommation mondiale de poissons que nous pouvons nourrir avec des microalgues.

Par ailleurs, les microalgues, grâce à leurs caractéristiques modifiables par

traitement OGM<sup>20</sup>, peuvent produire à partir du CO<sub>2</sub> des protéines ou des huiles. Cela peut se faire, soit dans des réacteurs « raceways<sup>21</sup> »,

soit dans des photo-bioréacteurs (Figure 32). Ainsi, il est possible de fabriquer des protéines (Figure 33) pour les utiliser dans l'alimentation des poissons, de manière similaire à l'utilisation du maïs pour les poulets. Il existe donc plusieurs stratégies et idées à explorer.

20. Organisme génétiquement modifié.

21. Réacteurs type « bassins ouverts ».



Figure 32

À gauche, un « raceway » ; à droite, un photobioréacteur à microalgues.

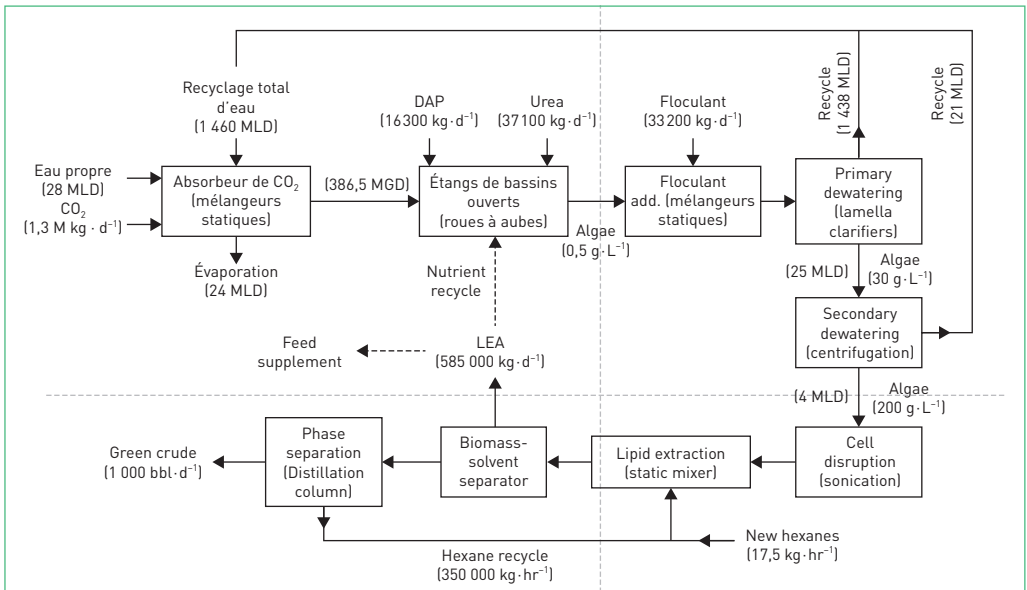


Figure 33

Procédé chimique d'extraction de protéines et d'huiles à partir des microalgues.



Figure 34

Bassins de microalgues du programme VASCO.

Un programme européen, développé à Fos-sur-Mer dans le cadre du programme VASCO, recycle les fumées de l'unité de pétrochimie de la région, associant 12 industriels. Ces fumées sont dirigées vers des bassins où des microalgues sont cultivées (Figure 34). La culture de ces microalgues démontre la possibilité d'obtenir 1 kilo de biohuile à partir de concentré, suggérant le début d'une commercialisation.

Condition essentielle : il faudra attribuer une valeur ajoutée aux émissions évitées, tout comme le font les agences de bassin pour l'eau en pénalisant tous ceux qui émettent de l'eau polluée. Actuellement, le cycle financier de la gestion des fumées n'est pas bouclé, ce qui explique les difficultés industrielles rencontrées pour établir un modèle économique.

## Conclusion : le recyclage des terres rares du type lanthanides

En guise de conclusion, mettons en avant la créativité humaine avec l'exemple du recyclage des lanthanides. Un biologiste volcanologue, Arjan Pol, a eu la curiosité d'aller récupérer avec une louche de cuisine un peu de boue évoluant à la surface d'un bassin volcanique (Figure 35). Il y a mis en évidence la présence d'une bactérie, *Methylococcus*, produisant une protéine, la lanmoduline (Figure 36), qui piège les terres rares néodyme et dysprosium sur trois sites de sa structure



Figure 35

Arjan Pol récupérant la boue d'un bassin volcanique.

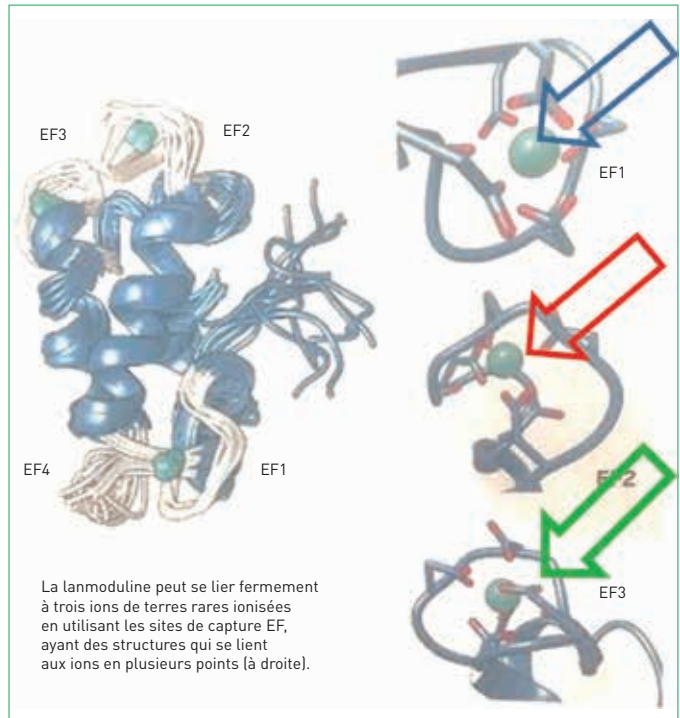


Figure 36

Structure de la lanmoduline et ses trois sites de capture.

moléculaire. Dans l'hypothèse où ces terres rares n'existent pas, la bactérie disparaît.

À partir de là, il a imaginé un système d'extraction liquide-liquide (Figure 37), qui n'est pas

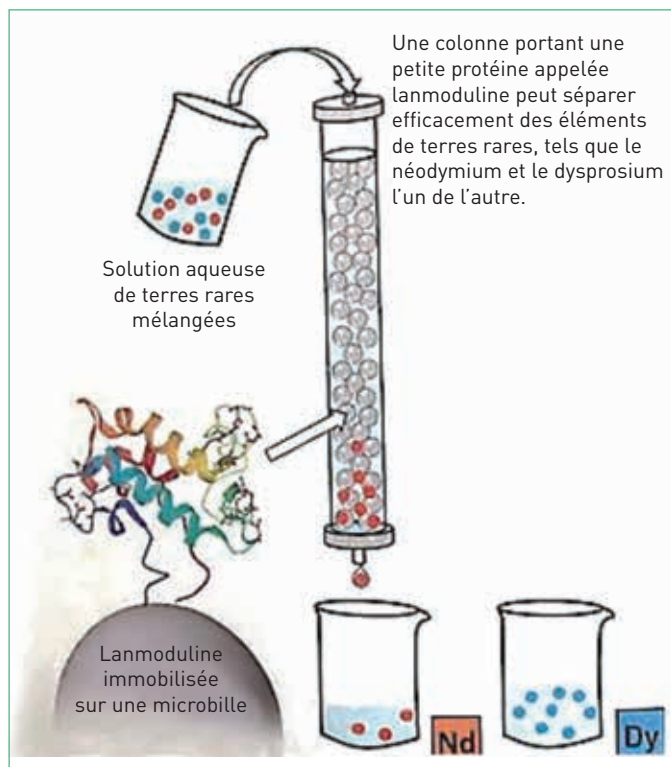


Figure 37

Extraction liquide-liquide par une colonne séparative grâce à la lanmoduline.

réalisable par des voies chimiques traditionnelles, pour récupérer quelques ppm de ces deux terres rares à partir d'un mélange issu d'un procédé de recyclage.

La conclusion est que l'avenir de la société repose entre les mains de ceux qui acceptent les défis. La science est notre bouclier, nous permettant d'imaginer le futur de notre civilisation. Comme le disait Einstein,

« *Imagination is more important than knowledge*<sup>22</sup> », le futur est entre vos mains.

Merci de le créer.

22. L'imagination est plus importante que la connaissance.