



COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —

## Pénurie des métaux stratégiques et chimie pharmaceutique : des problèmes aux solutions

AVENIR COMMUN  
— DURABLE —  
ÉNERGIE / ENVIRONNEMENT / SOCIÉTÉ

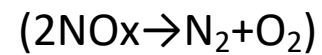
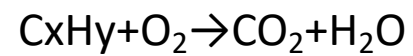
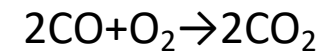
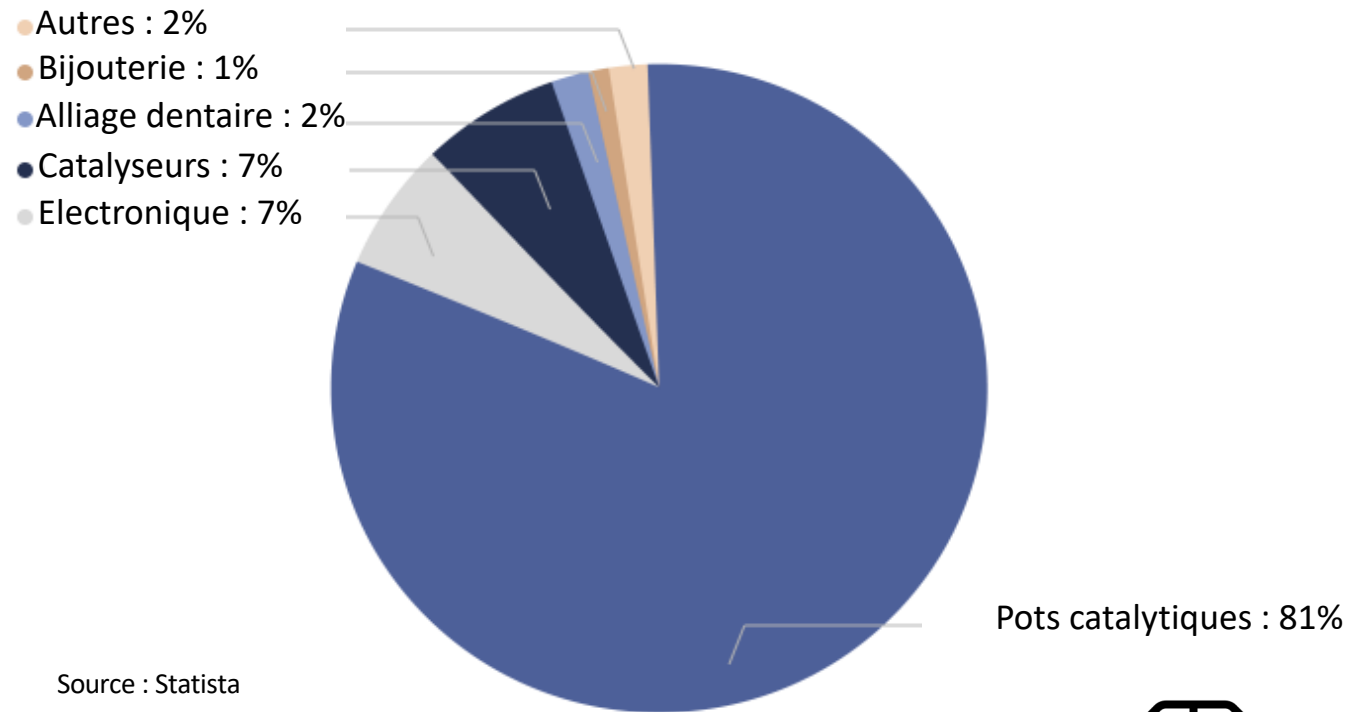


Cours du 31 mars 2026

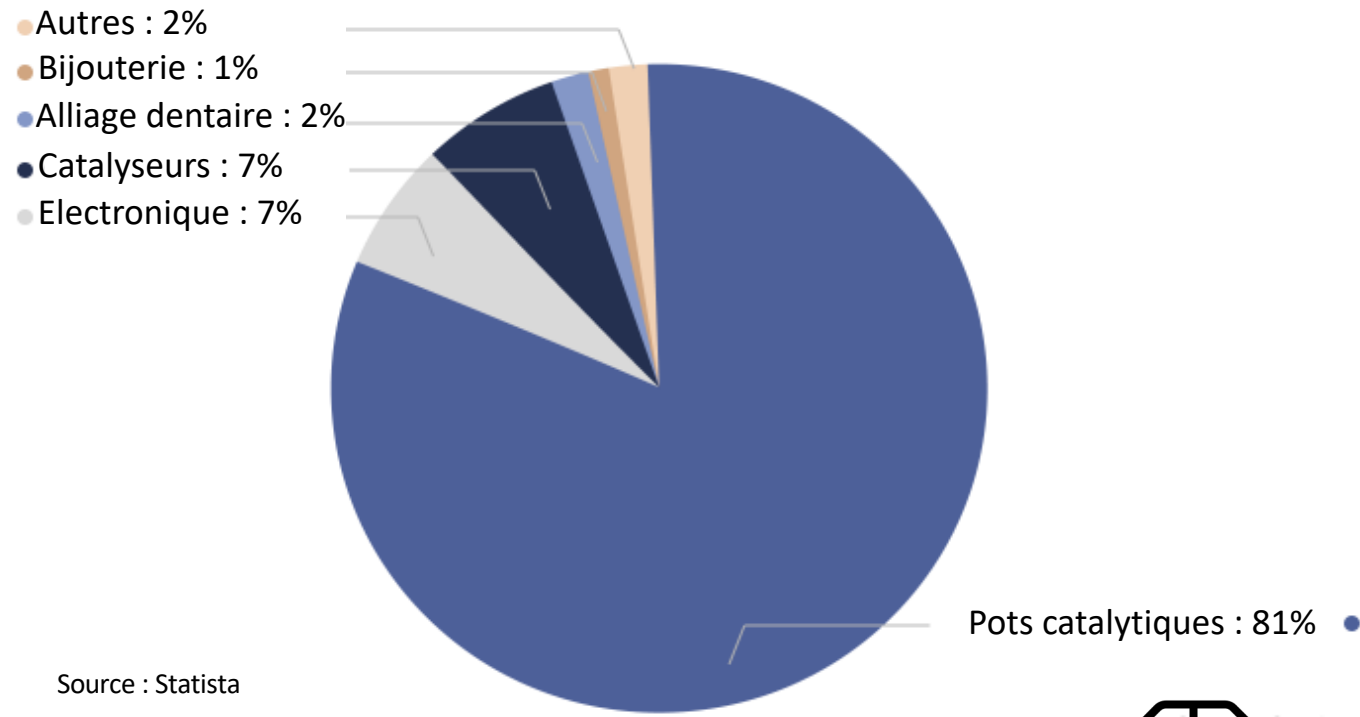
Pr. Claude Grison



# Consommation mondiale en palladium en 2021 par secteur (309 tonnes)



# Consommation mondiale en palladium en 2021 par secteur (309 tonnes)



Source : Statista

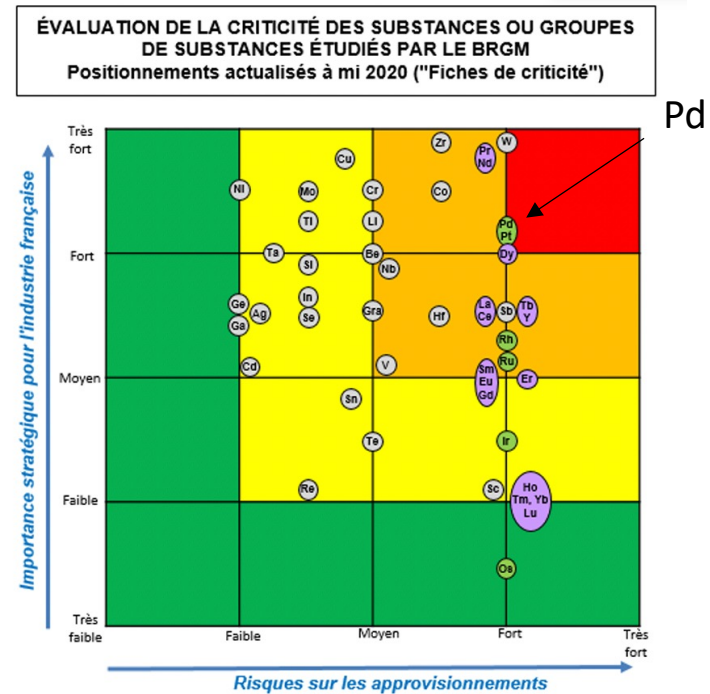
# Le Palladium : un métal très stratégique

## Etat des ressources

Surconsommation actuelle



Ressources connues épuisées en 2050

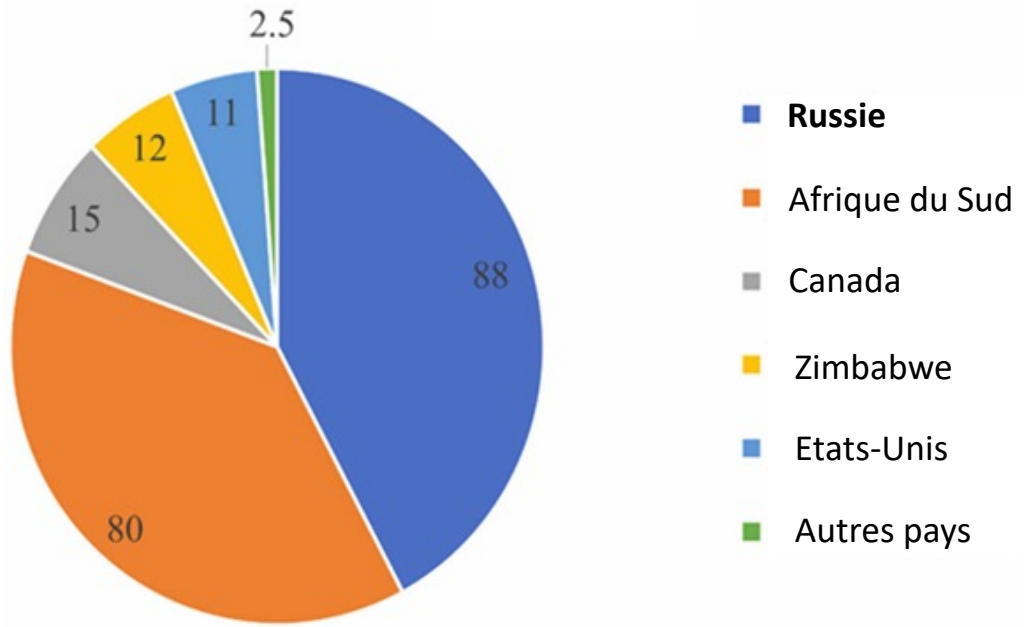


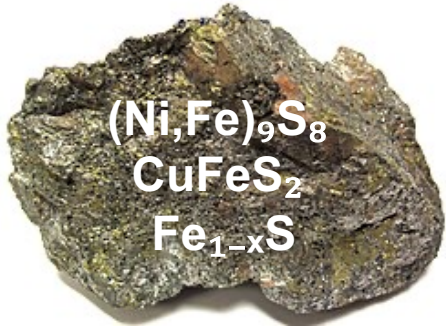
\* <https://www.mineralinfo.fr/fr/actualite/actualite/matrice-de-criticite-mise-jour-fin-2020-est-disponible-sur-mineralinfo>

\* <https://www.usinenouvelle.com/article/la-situation-du-palladium-devient-critique>.

# Contexte géopolitique

Production mondiale de palladium par pays en 2022 (en tonnes)





## Le Pd un sous-produit de l'industrie du nickel

➤ Gisements de gisements de type cuivre-nickel sulfuré de Norilsk (Russie)

- $\approx$  teneur moyenne : 3 g/t de palladium
- soit environ 0,0003 % en masse

➤ Extraction : Minerai  $\rightarrow$  Flottation  $\rightarrow$  Matte  $\rightarrow$  Raffinage Ni/Cu  $\rightarrow$  Boues anodiques  $\rightarrow$  Chimie des PGM  $\rightarrow$  Pd métal

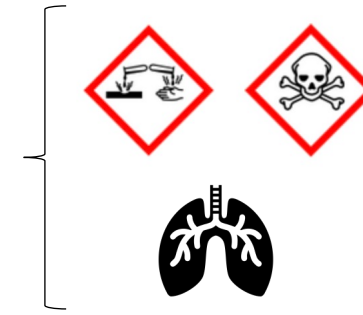
➤ 2 % du PIB de la Russie



## 1) Pollution atmosphérique massive (impact principal)

Émissions de SO<sub>2</sub> lors de la fusion de minerais sulfurés (Ni–Cu)

👉 Environ 1,6 à 1,9 million de tonnes de SO<sub>2</sub>/an



- pluies acides à grande échelle -> destruction de la végétation (taïga)
- pollution transfrontalière (jusqu'en Scandinavie)

### Autres polluants atmosphériques :

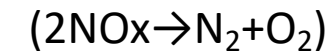
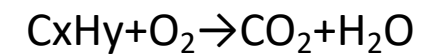
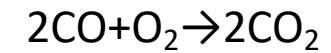
- particules chargées en Ni, Cu
- NO<sub>x</sub>, poussières, composés soufrés

👉 toxicité chronique pour les populations

👉 bioaccumulation dans les chaînes alimentaires



Un pot catalytique : **transformation des gaz d'échappement** (CO, NO<sub>x</sub>, hydrocarbures) en composés moins nocifs



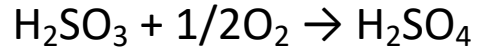
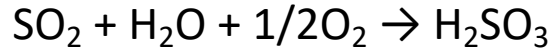
## 1) Pollution atmosphérique massive (impact principal)

Émissions de SO<sub>2</sub> lors de la fusion de minerais sulfurés (Ni–Cu)



➡ Environ 1,6 à 1,9 million de tonnes de SO<sub>2</sub>/an

- pluies acides à grande échelle -> destruction de la végétation (taïga)
- pollution transfrontalière (jusqu'en Scandinavie)

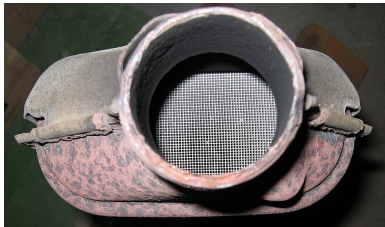


### Autres polluants atmosphériques

- particules chargées en Ni, Cu
- NO<sub>x</sub>, poussières, composés soufrés

➡ toxicité chronique pour les populations

➡ bioaccumulation dans les chaînes alimentaires



Un pot catalytique : transformation des gaz d'échappement (CO, NO<sub>x</sub>, hydrocarbures) en composés moins nocifs



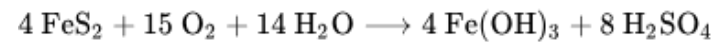
## 2) Dégradation des écosystèmes terrestres

- des milliers de km<sup>2</sup> de végétation détruite (effet combiné SO<sub>2</sub> + métaux)
- sols fortement acidifiés et contaminés
- 👉 paysages de “forêt morte” autour des complexes métallurgiques

## 3) Pollution des eaux

- rejets industriels (métaux dissous, sulfates)
- drainage minier acide (AMD)

### Exemple de FeS<sub>2</sub>



## 2) Dégradation des écosystèmes terrestres

- des milliers de km<sup>2</sup> de végétation détruite (effet combiné SO<sub>2</sub> + métaux)
- sols fortement acidifiés et contaminés
- 👉 paysages de “forêt morte” autour des complexes métallurgiques

## 3) Pollution des eaux

- rejets industriels (métaux dissous, sulfates)
- drainage minier acide (AMD)
- accidents industriels (2020 : 21 000 T de diesel échappés)

## 4) Déchets solides et résidus

- énormes volumes de **scories et résidus sulfurés**
- production de **gypse** lors de la capture du SO<sub>2</sub>

1,29 % de Ni, 2,08 % de Cu et 6,77 g/t de platinoïdes

> 96% de déchets



## 2) Dégradation des écosystèmes terrestres

- des milliers de km<sup>2</sup> de végétation détruite (effet combiné SO<sub>2</sub> + métaux)
- sols fortement acidifiés et contaminés
- 👉 paysages de “forêt morte” autour des complexes métallurgiques

## 3) Pollution des eaux

- rejets industriels (métaux dissous, sulfates)
- drainage minier acide (AMD)
- accidents industriels (2020 : 21 000 T de diesel échappés)

## 4) Déchets solides et résidus

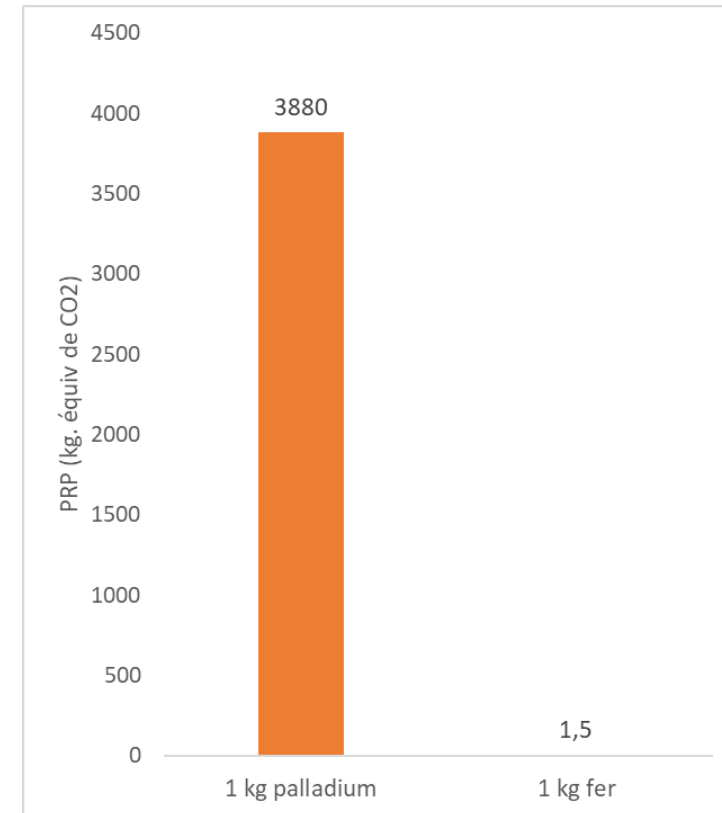
- énormes volumes de **scories et résidus sulfurés**
- production de **gypse** lors de la capture du SO<sub>2</sub>

## 5) Intensité carbone et énergétique

Le procédé est :

- fortement **énergivore** (fusion à haute température)
- dépendant d'énergies fossiles dans l'Arctique
- 👉 Contribution significative aux émissions de CO<sub>2</sub> (moins documentée que le SO<sub>2</sub>, mais structurellement élevée).

Potentiel de réchauffement planétaire (PRP) pour 1 kg de métal



## L'un des sites industriels les plus pollués au monde

- **Air** : jusqu'à ~2 Mt/an de SO<sub>2</sub> (impact dominant)
- **Sols** : destruction massive de la végétation
- **Eaux** : contamination chronique + accidents majeurs
- **Déchets** : volumes importants de résidus sulfurés
- **Tendance** : amélioration en cours mais impact encore très élevé



crédit : Pavel Kuzmichev / Gateway to Russia

👉 l'espérance de vie des habitants est inférieure à la moyenne russe d'environ dix ans (données du CNES)



Vladimir Potanine  
(patron et copropriétaire de Nor Nickel)

## Délocalisation d'une partie de la production en Chine

24 février 2022



« sanctions infligées à la Russie : accès au crédit restreint  
-> frais supplémentaires en paiements d'intermédiaires,  
d'assurances, de commissions »



Cu, Ni, Co, Li

## La catalyse au palladium est indispensable à l'industrie pharmaceutique moderne



Bilan 2020-2024 : **32%** des nouvelles petites molécules approuvées par la FDA par an utilisent une **catalyse au palladium de type couplages croisés**

### The Nobel Prize in Chemistry 2010



Richard Heck



Ei-ichi Negishi



Akira Suzuki

*"for palladium-catalyzed cross couplings in organic synthesis"*



## La catalyse au palladium est indispensable à l'industrie pharmaceutique moderne



Bilan 2020-2024 : **32%** des nouvelles petites molécules approuvées par la FDA par an utilisent une catalyse au palladium de type couplages croisés



La catalyse au palladium est un outil clé pour la construction de nouveaux médicaments et elle n'est pas remplaçable (Cf Nature Juin 2022, Pour la Science Nov 2022)

### La malédiction du palladium

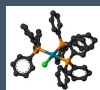
Grâce à la catalyse au palladium, l'industrie chimique est aujourd'hui capable de synthétiser des molécules complexes, essentielles à la production de médicaments. Si il est devenu indispensable, le palladium est aussi rare, très coûteux et toxique. Les chimistes multiplient les efforts pour s'en passer – jusqu'ici sans succès.

# Deux problèmes majeurs dans la synthèse de médicaments issus de la catalyse au palladium



Thomas Fuchß, chimiste chez Merck (1<sup>ère</sup> ind. pharma mondiale)

3 kilogrammes d'un principe actif = **250 000 \$ US**



Le catalyseur au palladium : **100 000 \$ US**



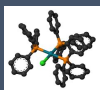
Purification du produit pour retirer le palladium = **30 000 \$ US**

# Deux problèmes majeurs dans la synthèse de médicaments issus de la catalyse au palladium



Thomas Fuchß, chimiste chez Merck (1<sup>ère</sup> ind. pharma mondiale)

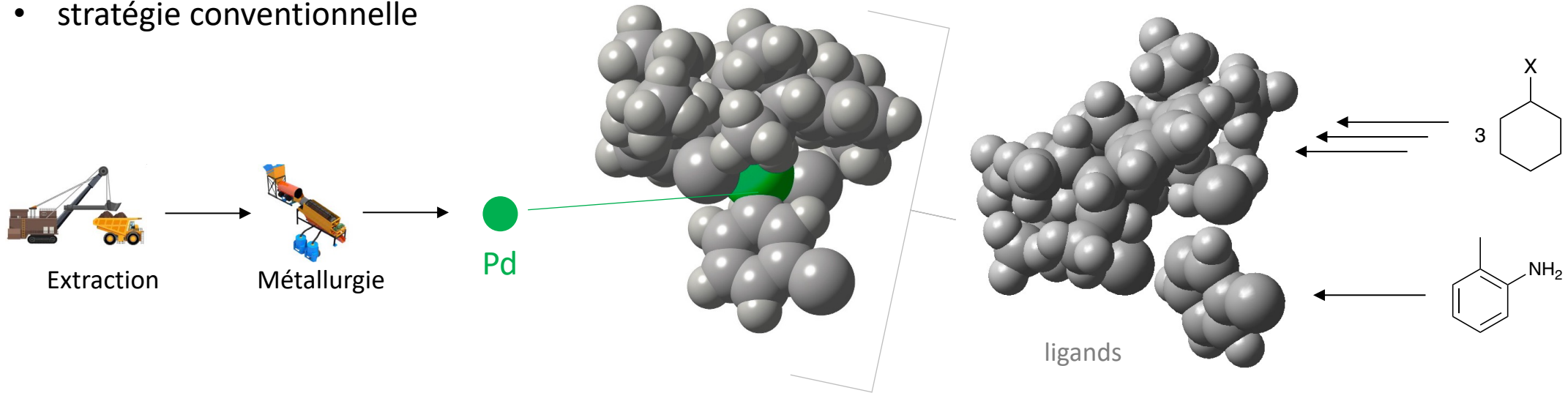
3 kilogrammes d'un principe actif= **250 000 \$ US**



Le catalyseur au palladium : **100 000 \$ US**

# Le Palladium : une catalyse en mal de sobriété et de réalisme

- stratégie conventionnelle



1/Le **palladium** coûte très cher

2/Les **ligands** associés également

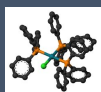
3/Le catalyseur n'est pas recyclable

# Deux problèmes majeurs dans la synthèse de médicaments issus de la catalyse au palladium



Thomas Fuchß, chimiste chez Merck (1<sup>ère</sup> ind. pharma mondiale)

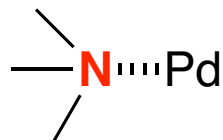
3 kilogrammes d'un principe actif = 250 000 \$ US



Le catalyseur au palladium : 100 000 \$ US

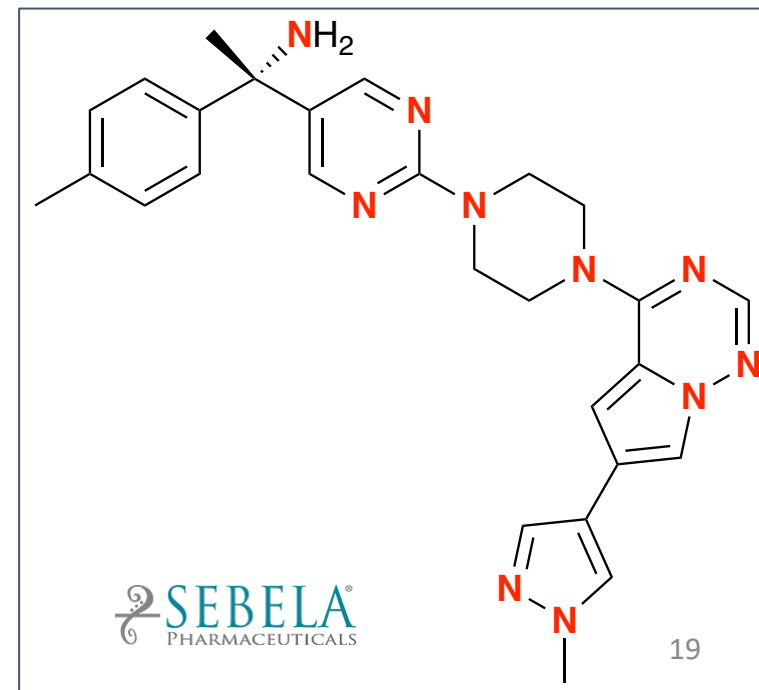


Purification du produit pour retirer le  
palladium = 30 000 \$ US



*Ayvakit (Avapritinib) / FDA Approved in 2020*

Traitement contre la tumeur stromale gastrointestinale

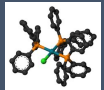


# Deux problèmes majeurs dans la synthèse de médicaments issus de la catalyse au palladium



Thomas Fuchß, chimiste chez Merck (1<sup>ère</sup> ind. pharma mondiale)

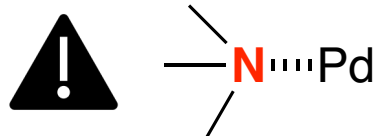
3 kilogrammes d'un principe actif = 250 000 \$ US



Le catalyseur au palladium : 100 000 \$ US

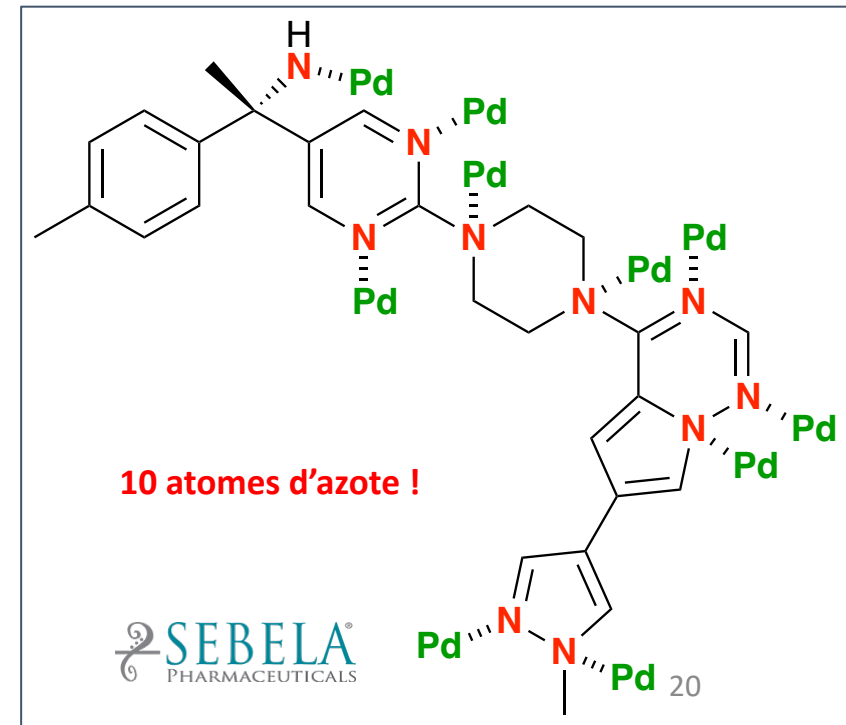


Purification du produit pour retirer le  
palladium = 30 000 \$ US



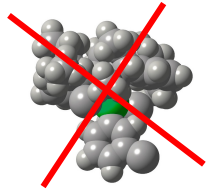
*Ayvakit (Avapritinib) / FDA Approved in 2020*

Traitement contre la tumeur stromale gastrointestinale



# Les défis

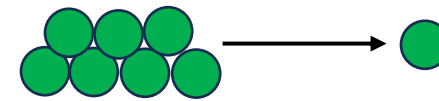
- s'affranchir du ligand



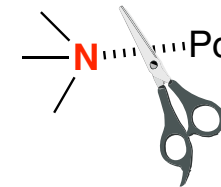
- maintenir une activité catalytique pour des molécules pharmaceutiques



- maintenir une activité avec une faible quantité de palladium



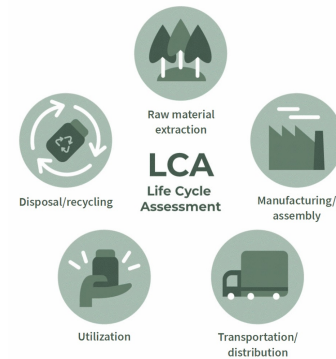
- séparer efficacement et facilement le palladium du principe actif



- recycler le catalyseur

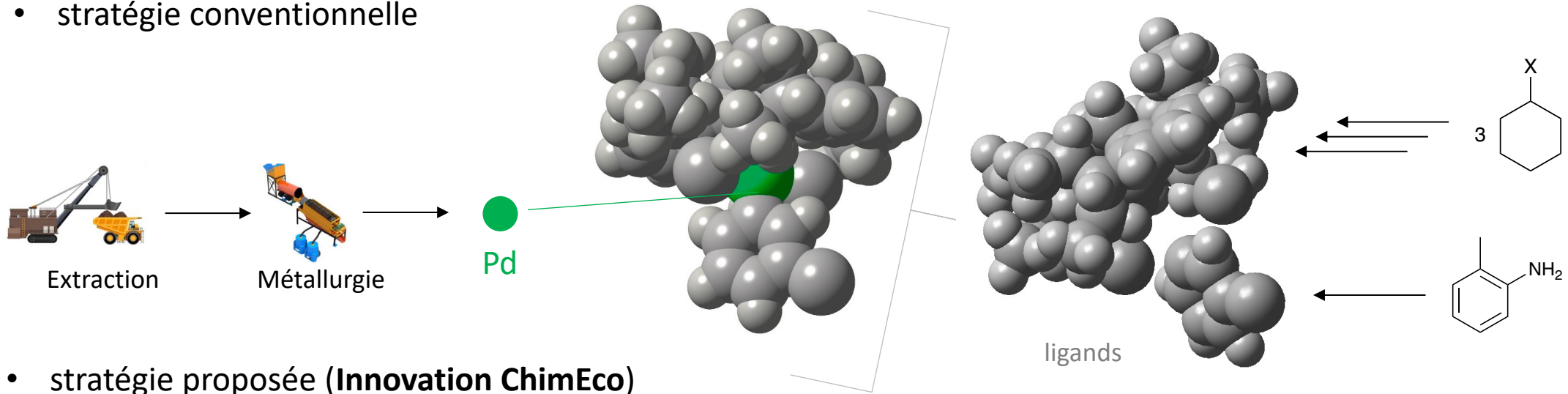


- s'inscrire dans une démarche éco-responsable (base, solvant, énergie, déchets, ...)

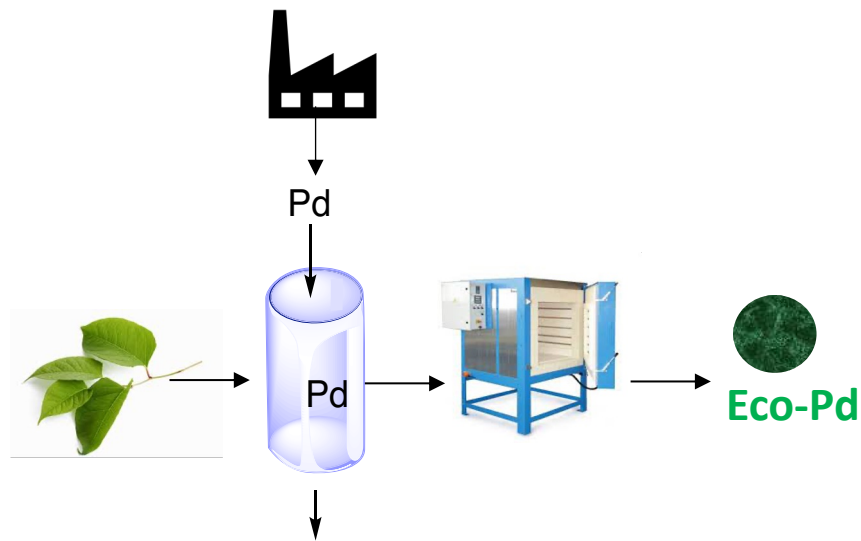


# Le Palladium : une catalyse en mal de sobriété et de réalisme

- stratégie conventionnelle



- stratégie proposée (Innovation ChimEco)

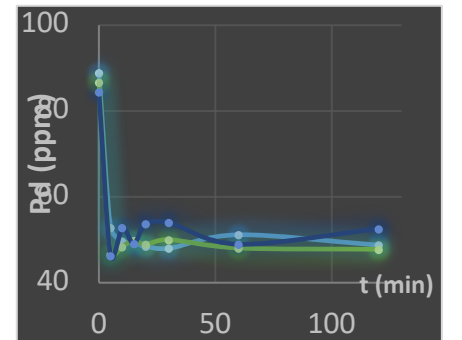
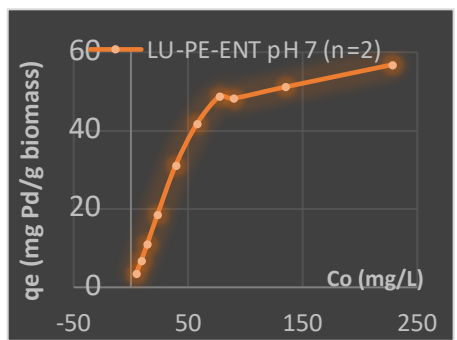


Quelle activité pour la synthèse des cibles pharmaceutiques ?

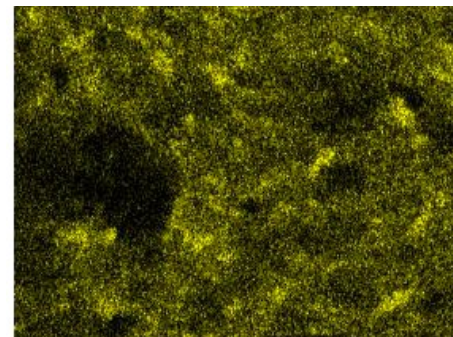
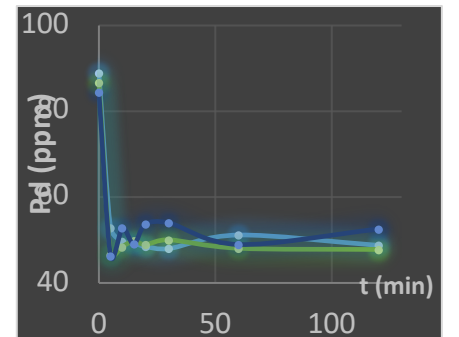
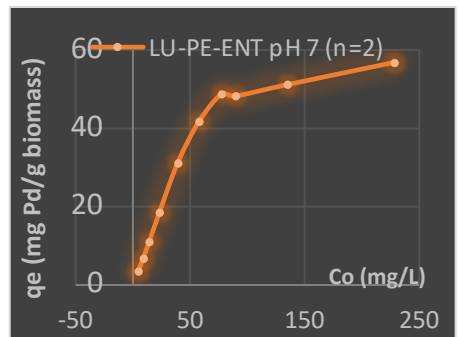
## Une gestion écoresponsable de *Ludwigia peploides*



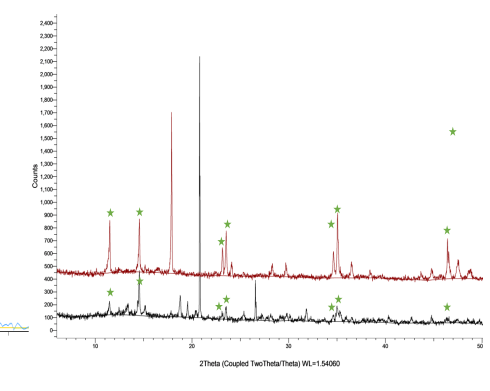
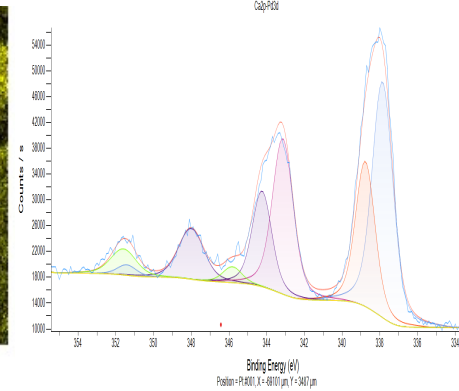
# Une gestion écoresponsable de *Ludwigia peploides*



# Une gestion écoresponsable de *Ludwigia peploides*

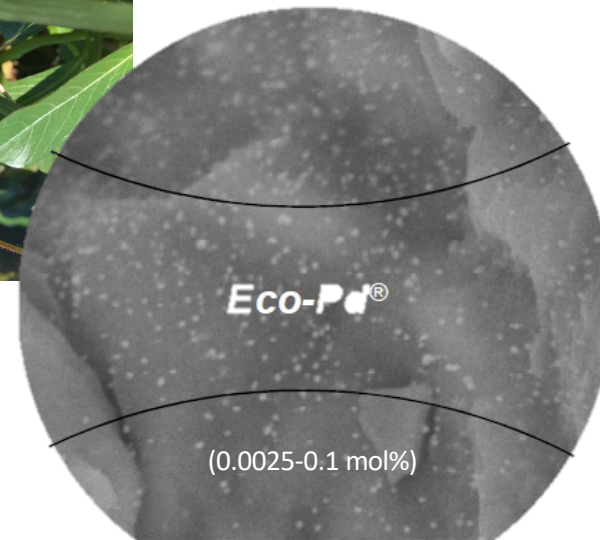


10µm

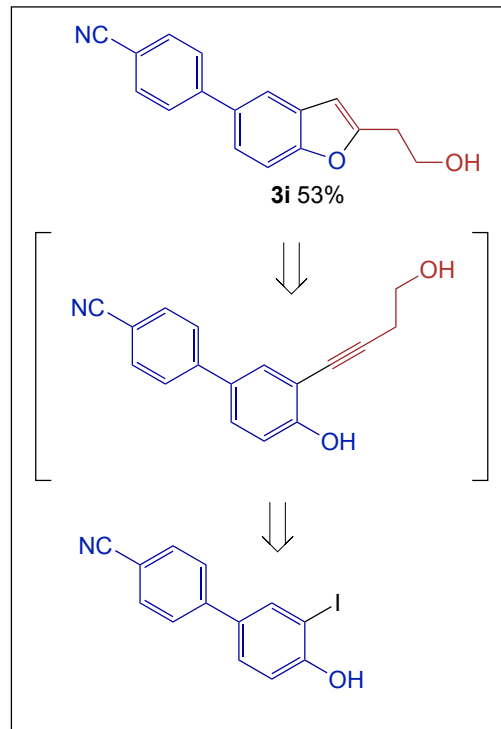
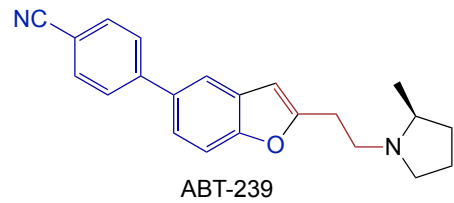


# Une nouvelle génération d'écocatalyseurs

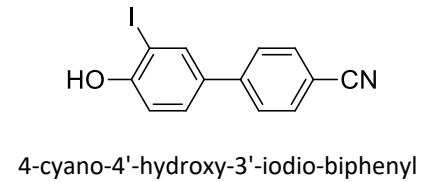
## ➤ Réactions de coulages croisés



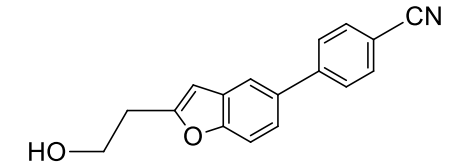
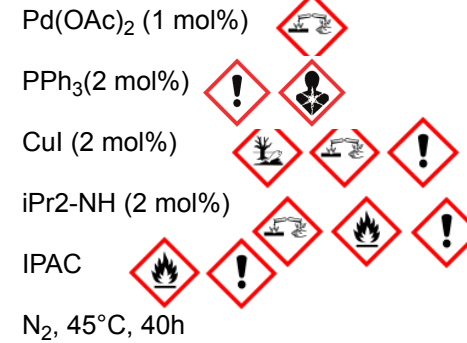
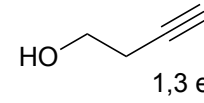
# Application à la synthèse directe de l'ABT-239



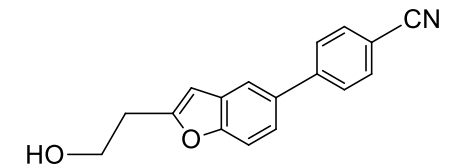
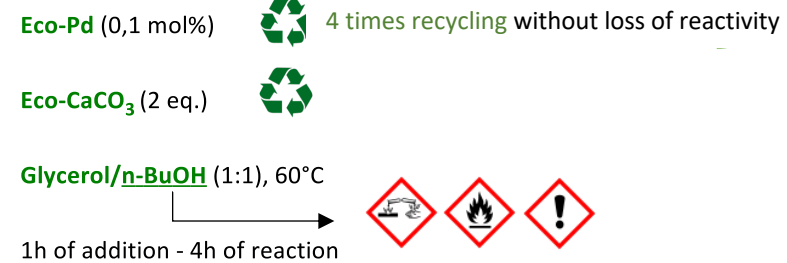
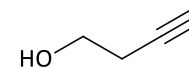
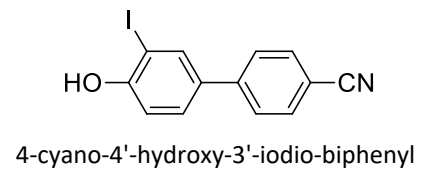
## Abbott process<sup>1</sup>



butyn-3-ol



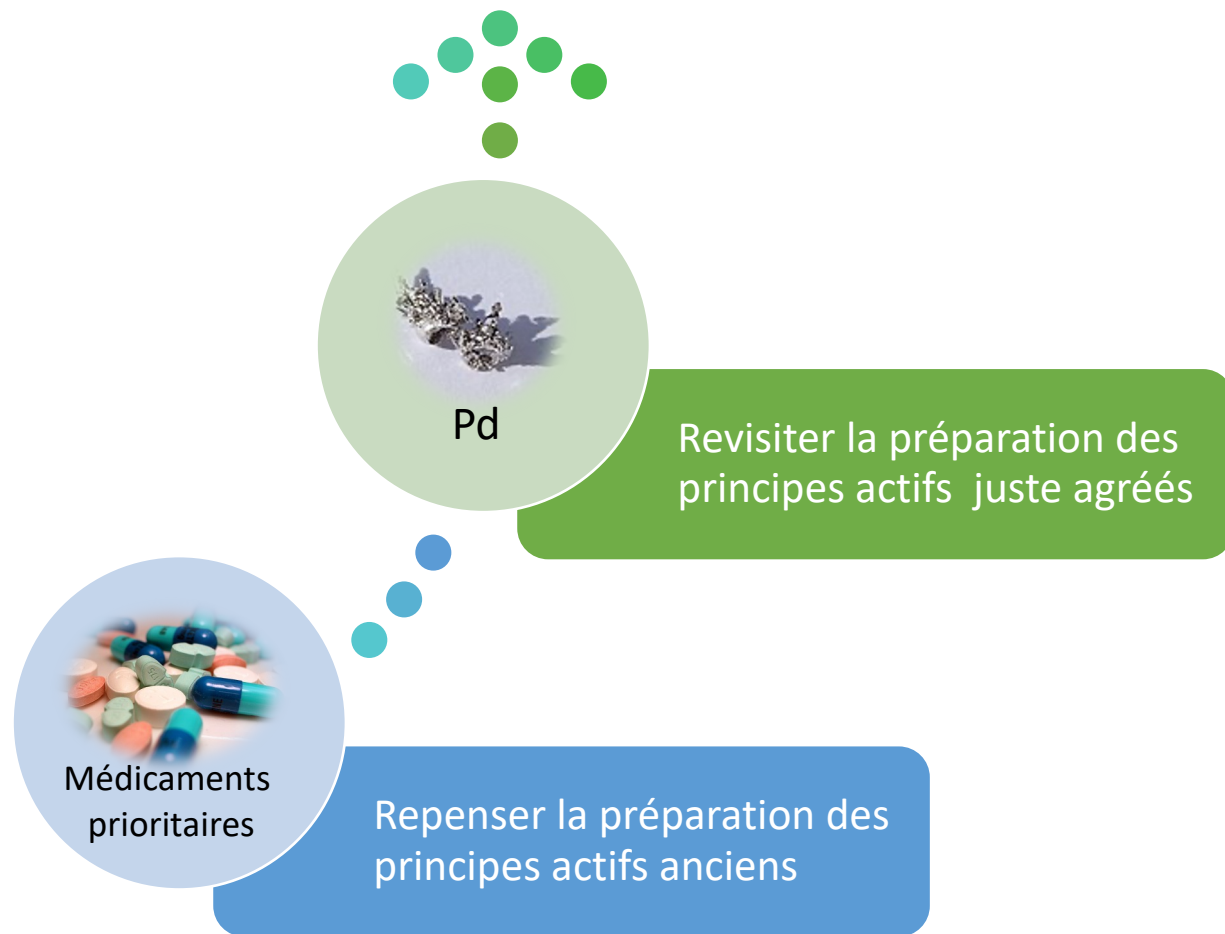
## ChimEco process<sup>2</sup>



<sup>1</sup> Pu, Y. M.; Grieme T.; Gupta A.; Plata D.; Bhatia A. V.; Cowart M.; Ku Y. Y. *Organic Process Research & Development* **2005**, 9, 45-50

<sup>2</sup> Adler P.; Dumas T.; Deyris P. A.; Petit E.; Diliberto S.; Boulanger C.; Grison C. *Journal of Cleaner Production* 293 **2021** 126164

# Souveraineté sanitaire



Merci !

