Chimie verte

Introduction

Economie d'atome et réduction des déchets

Concevoir des produits biodégradables

Utilisation de matières premières renouvelables

Utilisation de la catalyse

Réduction des COV

Technologies nouvelles, intensification des procédés et sources d'énergies alternatives

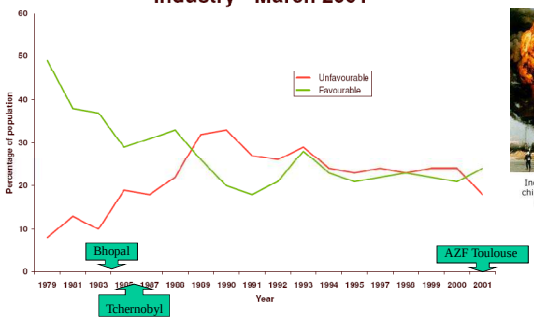
Chimie verte: Introduction

20ème siècle ➔ Innovations technologiques liées à la chimie

- *Médecine et pharmacie*
- *Habillement*
- *Alimentation*
- *Bureautique*
- *Maison*

Chimie verte: Introduction

The Public Perception of the Chemical Industry - March 2001



Incendie de l'usine chimique de Seveso (Italie), 1976.

➢ **Challenge 21ème siècle: poursuivre les progrès techniques engagés de manière économiquement viable en limitant les effets 2aires vis-à-vis de l'environnement.**

Développement durable et chimie verte

➢ 1987: Rapport Bruntland « Our common future » (Commission mondiale sur l'environnement et le développement des Nations Unies (WCED)):

« Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs. »

➢ **2 questions fondamentales:**

- *Jusqu'à quand pourrons-nous exploiter les réserves d'NRJ fossile ?*
- *Quelle quantité de déchets et de pollution pouvons-nous rejeter dans l'atmosphère sans conséquence en terme d'environnement et de santé ?*

➢ **2 concepts sont inhérents à cette notion** :

- le concept de « besoins », et plus particulièrement des besoins essentiels des plus démunis, à qui il convient d'accorder la plus grande priorité,
- l'idée des limitations que l'état de nos techniques et de notre organisation sociale impose sur la capacité de l'environnement à répondre aux besoins actuels et à venir.

Développement durable et chimie verte

Naissance du concept de **chimie verte** au début des années 90:

✓ Le concept de chimie verte est défini en 1998 par les chimistes américains Paul Anastas et John C. Warner, appartenant à l'EPA, Environmental Protection Agency.

✓ La chimie verte prévoit l'utilisation de principes pour réduire et éliminer l'usage ou la génération de substances néfastes pour l'environnement, par de nouveaux procédés chimiques et des voies de synthèses « propres », c'est-à-dire respectueuses de l'environnement.

Le terme néfaste => dangers physique, toxicologique ou global

Développement durable et chimie verte

Innovations et connaissances en chimie (sciences chimiques, biotechnologies, génie des procédés)

=> Indispensables pour l'avènement d'un développement durable.

- Social/Sociétal: médicaments, protection contre les insectes, informatique/communications, textiles, conservateurs…

- Environnement: procédés propres et sûrs, traitement des effluents et des déchets, procédés de recyclage, bioénergies, valorisation de mat. 1ères renouvelables, analyses d'éléments trace, compréhension des éco-systèmes…

- Economique: implication dans tous les secteurs éco (bâtiment, automobile…), innovations comme source de croissance, réponse aux attentes des clients sensibilisés aux enjeux écologiques.

Développement durable et chimie verte

Modèle industriel standard: Extraire ➢ Produire ➢ Distribuer ➢ Jeter

Modèle d'éco-efficacité (chimie verte): ➢ Réutiliser ➢ Recycler… et … Réglementer

=> Réduire
- ✧ risques
- ✧ produits
- ✧ déchets
- ✧ consommation d'NRJ
- ✧ impact environnemental
- ✧ coûts

Les 12 principes de chimie verte

1- Prévention

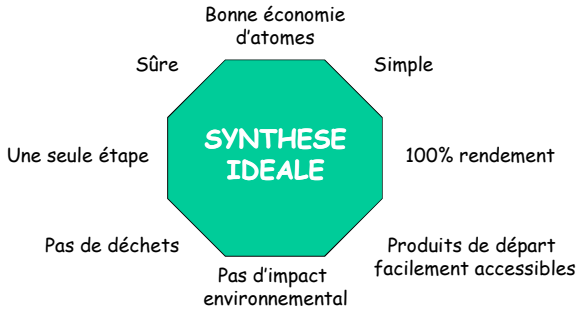
1. Produire moins de déchets plutôt qu'investir dans leur
2. Maximiser l'incorporation dans le produit final des
3. Utiliser ou créer des substances faiblement ou non toxiques
4. Ils doivent être conçus de manière à remplir leur fonction
5. Si possible supprimer l'utilisation de solvants, d'additifs ou
6. Les besoins énergétiques des procédés chimiques ont des
7. Si la technologie et/ou les moyens financiers le permettent
8. Toute déviation inutile du schéma de synthèse doit être

12. Substances utilisées dans un procédé chimique de manière à minimiser les risques d'accidents chimiques
11. Développement de nouvelles méthodes analytiques (contrôle en temps réel, en cours de production…)

I- Economie d'atome et réduction des déchets

Economie d'atomes

Approche cherchant à maximiser le nombre d'atomes de réactifs transformés en produits au cours de la synthèse. Elle permet de réduire la quantité de résidus issus de la réaction voire de les supprimer totalement…



Quelques questions à se poser…

✓ Y-a-t'il toujours besoin d'utiliser des solvants organiques ?

✓ Peut-on réduire le nombre d'étapes de fabrication ?

✓ Le réacteur choisi pour réaliser la réaction est-il le meilleur au point de vue énergétique et réduction des déchets ?

✓ Est-ce que les matières premières utilisées ne sont pas dangereuses ?

✓ Est-ce que les réactions effectuées sont sélectives ?

✓ Est-ce que les sous-produits générés peuvent être utilisés dans un autre procédé ?

Mesure de l'efficacité d'un procédé dans l'industrie chimique

- Economie d'atome (AE)
- Rendement
- Séléctivité
- Facteur économique (E)
- Rendement de masse efficace (RME)
- Intensité de masse (IM)
- Efficacité de masse de la réaction (EMR)

B M Trost Science 1991, 254, 1471

Economie d'atome

Rendement= $\dfrac{\text{Masse expérimentale de produit obtenue}}{\text{Masse théorique de produit}} \times 100$

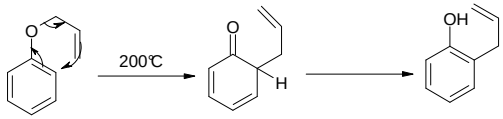
Sélectivité = $\dfrac{\text{Rendement en produit désiré}}{\text{\% de conversion du réactif}} \times 100$

Efficacité de réaction = $\dfrac{\Sigma \text{ MM des produits désirés}}{\Sigma \text{ MM de tous les produits}} \times 100$

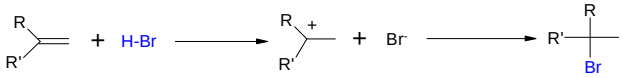
Economie d'atome = $\dfrac{\Sigma \text{ MM des produits désirés}}{\Sigma \text{ MM de tous les réactifs}} \times 100$

Réactions favorables ou défavorables en terme d'économie d'atomes

☺ *Réarrangement de Claisen:*

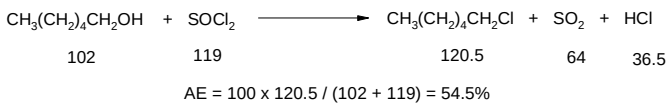


☺ *Addition électrophile:*



Réactions favorables ou défavorables en terme d'économie d'atomes

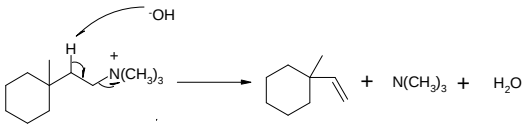
☹ *Réactions de substitution:*



AE = 100 x 120.5 / (102 + 119) = 54.5%

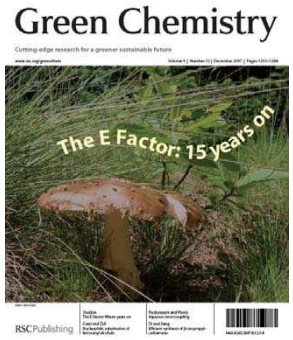
☹ *Réactions d'élimination:*

Elimination d'Hofmann:



Autres paramètres d'évaluation d'une réaction …

Facteur Environnmental E = $\dfrac{\text{Masse de déchets totale}}{\text{Masse de produit}}$



✓ **Tous ces paramètres permettent d'effectuer un bilan et de chiffrer de façon globale le cout de la synthèse à réaliser.**

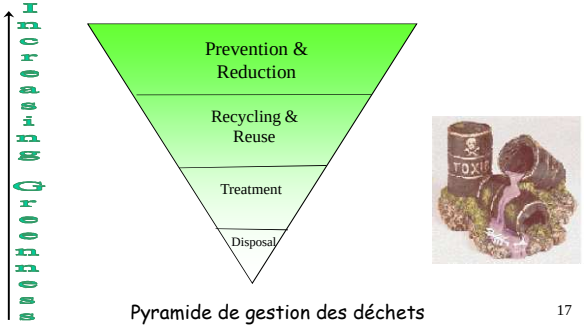
✓ **But = développer des synthèses favorables en terme d'économie d'atomes (le – de déchets possibles).**

Déchets: production, problèmes et prévention

Industrie, commerce, artisanat, transports = 456 Mt de déchets/an en France.

Recyclage et programmes de diminution des déchets pour diminuer l'impact sur sols, air et rivières et océans (loi du 13/07/1992).

Formule des « 4R » (« Zéro déchet »): Réduire, Responsabiliser, Réutiliser, Recycler



Pyramide de gestion des déchets

Déchets et industrie chimique

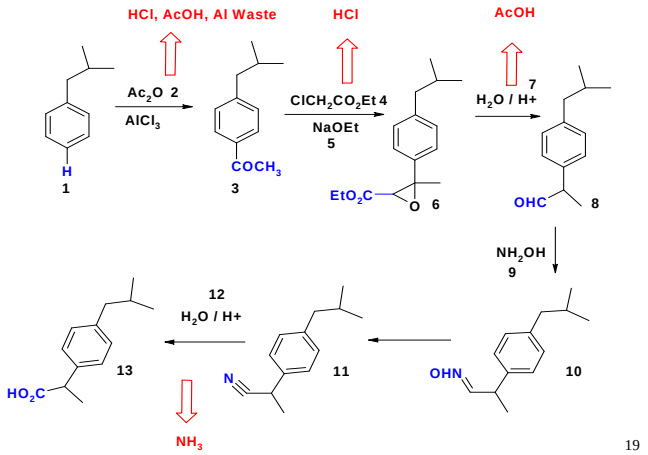
D'où viennent les déchets ?

Facteur E

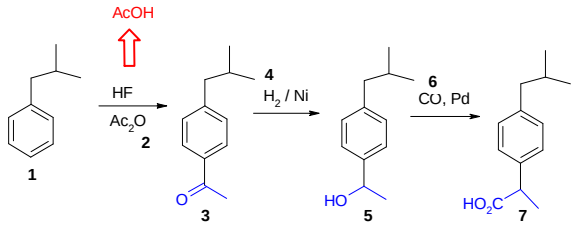
Industry Segment	TONNAGE	RATIO Kg Byproducts / Kg Product
Oil Refining	10^6 - 10^8	<0.1
Bulk Chemicals	10^4 - 10^6	1 - 5
Fine Chemicals	10^2 - 10^4	5 - 50
Pharmaceuticals	10 - 10^3	25 - 100+

- Des secteurs traditionnellement considérés comme polluants (raffinage et chimie lourde) sont en fait plutôt "propres"
- Des industries plus récentes avec des marges de profit plus grandes et utilisant une chimie plus complexe produisent en proportion plus de déchets

Voie de synthèse initiale de l'Ibuprofène (1965)



Voie de synthèse actuelle de l'Ibuprofène



Techniques de minimisation des déchets

Aujourd'hui : Législation

⇨ émission et rejet de substances nocives illégales (**répression**)

⇨ taxes environnementales (**incitation**)

⇨ Culture d'entreprise – démarche volontaire:

1) ↘ conso H_2O, NRJ, produits chimiques

2) Réactualisation de la chimie et des process de production

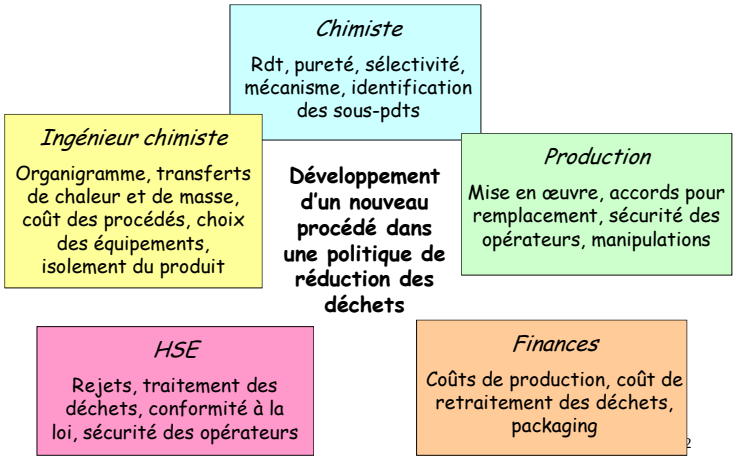
Ex: Programme « 3P » lancé par 3M en 1975: Pollution Prevention Pays

- *Reformulation des pdts*
- *Recyclage des pdts de départ et de l'NRJ*
- *Utilisation d'enrobage aqueux pour fab des comprimés*

Economie = 10.000 t/an de rejets aqueux

100.000 t/an d'émissions atmosphériques

Une approche pluri-disciplinaire concertée



Conception de procédés diminuant la production de déchets

Synthèse multi-stade complexe: organigramme précis de l'ensemble du process indiquant masses engagées et produites, EA.

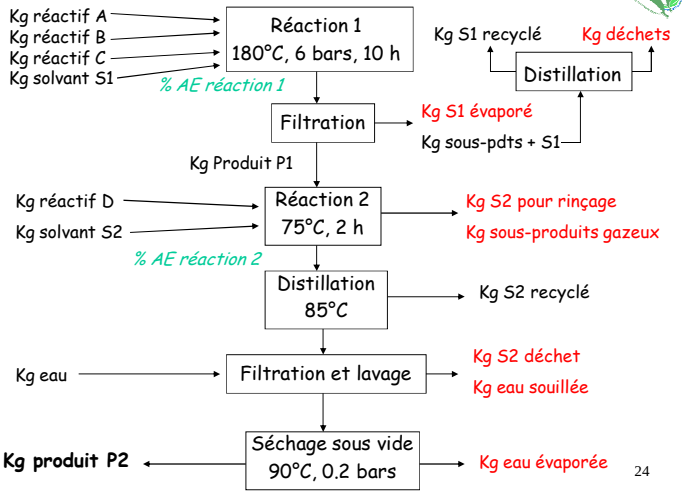
▷Quelle partie du procédé produit le + de déchets ?

▷Quelle partie du procédé consomme le + d'NRJ ?

Comparaison: - volume et nature des déchets

- balance des masses
- contaminants
- coût des équipements
- complexité des opérations
- consommation d'NRJ
- toxicité

Conception de procédés diminuant la production de déchets



Traitement des déchets sur site

Les déchets et effluents ne peuvent pas être réduits à néant.

Traitement nécessaire pour rendre ces effluents moins dangereux à leur sortie de site

- Physique
- Chimique
- Biologique

} Indépendamment ou en association

Le choix dépend - de la toxicité
- du volume et de la nature du déchet
- du coût

Traitement des déchets sur site

Traitements physiques: séparer et trier les déchets

⌦ Filtrations (sur agents, résines), distillations (hydrodistillation), centrifugation

Traitements chimiques:

⌦ Neutralisation (cas idéal: neutralisation mutuelle de 2 effluents aqueux acide / basique)

⌦ Oxydation: traitement de faibles conc de déchets toxiques en solution (H_2O_2, O_3, $NaClO_2$, $KMnO_4$)

⌦ Procédés électrochimiques

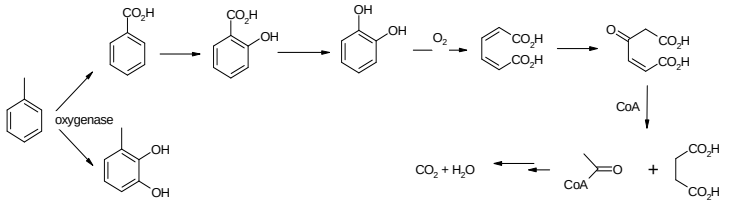
⌦ Précipitation de sels de métaux

Traitement des déchets sur site

Traitements biologiques:

Biodégradation = mat. organique traitée par microorganismes

Étapes de réactions enzymatiques ➢ *dégradation complète* ou *minéralisation*



II - Concevoir des produits biodégradables

Des produits conçus pour se dégrader

Prise de conscience concernant le devenir des produits manufacturés qui finissent leur vie dans l'environnement en tant que déchets

Plastiques, détergents, agents agrochimiques non biodégradables

↓

Pollution, toxicité potentielle (par accumulation)

Ex: détergents synthétiques, DDT, polymères non dégradables

→ **Nécessité de concevoir des produits chimiques en tenant compte de leur devenir post-usage**

Des produits conçus pour se dégrader

Pré-requis en terme de gpes fonctionnels et de structure moléculaire pour conduire à des pdts à haute dégradabilité:

☺ Analogues de produits naturels

☹ Pdts aromatiques ne contenant pas 2 C adjacents non substitués

☹ Pdts aromatiques substitués par des gpes électroattracteurs

☹ Cpsés hétérocycliques

☹ Chaînes aliphatiques branchées

☹ éthers aliphatiques ($ROCH_3$ …)

☹ C-Cl, C-F

☹ Pdts insolubles dans eau

☹ Pdts à haut PM

Voies de valorisation des emballages plastiques

Polymères thermoplastiques (linéaires ou ramifiés): peuvent être ramollis, déformés et remis en forme (*recyclables*)

	Propriétés	Applications
PE (polyéthylène)	Transparence, souplesse	Films, sacs, bouteilles
PEhd (polyéthylène haute densité)	Opacité, rigidité	Bidons, conteneurs, poubelles, seaux, jouets, bouteille de lait
PVC (polychlorure de vinyle)	Transparence, rigidité	Mobilier (bancs, fenêtres…), barrières, jouets, sols
PET (polyéthylène terephtalate)	Transparence, tenue à la pression interne	Bouteilles, boissons gazeuses, pull, rembourrage
PP (polypropylène)	Rigidité, résistance aux chocs	Boites, bacs, conteneurs, pare-chocs, tubes
PS (polystyrène)		Bouteilles, pots de yaourt
PA (polyamide)		Tissus

Voies de valorisation des emballages plastiques

Thermodurcissables: polymères réticulés, forme définitive

Ex: Phénoplastes, polyépoxydes, polyuréthanes, silicones

Elastomères: grande déformabilité

Ex: Polyisoprène (caoutchouc), néoprène

Légers, coût peu élevé, performants, faciles à mettre en oeuvre

☺ ↓

Développement de l'utilisation des matières plastiques

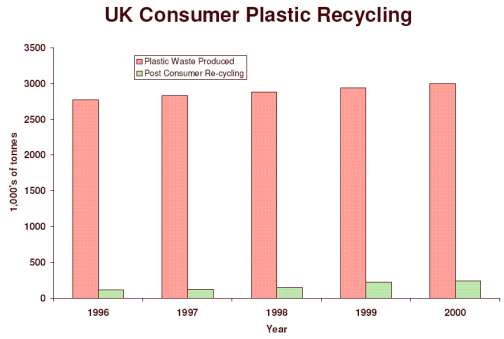
Pollution durable ☹

Voies de valorisation des emballages plastiques

Déchets d'emballage ménagers plastiques = 29 kg/habitant/an (+4.5%/an)

REM: Ttl des ordures ménagères= 400 kg/habitant/an

Recyclage des emballages plastiques: seulement **13.6%** !!! (2001)



Voies de valorisation des emballages plastiques

4 grandes voies de recyclage:

1/ Réutilisation après tri et remise en forme: (usages non alimentaires)

PU

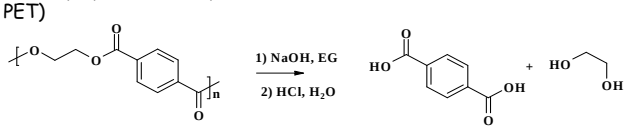
PE

PVC

Voies de valorisation des emballages plastiques

2/ Valorisation en matières 1ères pour la chimie:

Tri, dépolymérisation, purification des mat 1ères et réutilisation (ex: PET)



Monomères réutilisables

3/ Valorisation énergétique

Dans les incinérateurs les plastiques aident à la combustion des déchets ménagers

4/ Biodégradation et biofragmentation

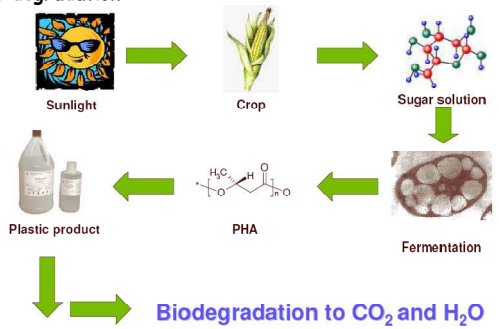
Plastique constitué de produits naturels (amidon de maïs ou de pomme de terre)

Biofragmentable = plastique se fragmente en libérant des particules invisibles non biodégradables dans l'air (**pollution!!**)

Biodégradable = pas de résidus polluants

Fabrication de plastiques à partir de matière 1ère renouvelable

- **Fabrication de plastiques à partir de produits naturels**
- **Incorporation de segments biodégradables dans le squelette du polymère (ex. amidon)**
- **Incorporation d'additifs pour augmenter le taux de photo ou chimio dégradation**



Développement de polymères biodégradables

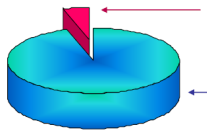
III - Utilisation de matières premières renouvelables

Valorisation des matières 1ères renouvelables

- **Actuellement** : Economie du pétrole :

98% des matières premières de l'industrie chimique sont issues de la pétrochimie

- **Biomasse renouvelable** :1200 milliards de tonnes/an



Sur cette quantité 0,5% seulement sont utilisés par l 'homme

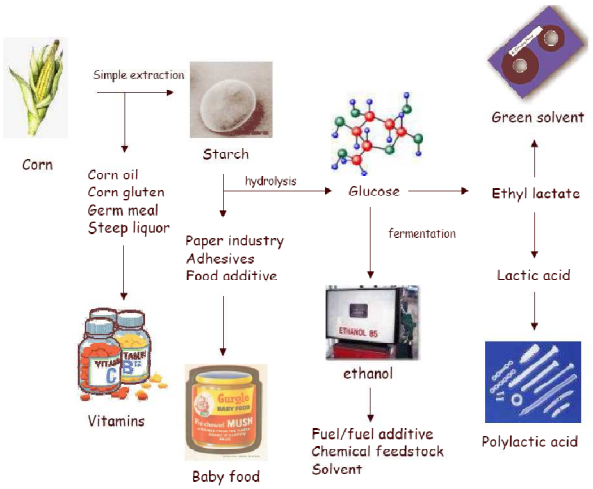
Sur cette quantité,à part l'énergie,les matériaux et le papier :
95% sont utilisés dans l'industrie agroalimentaire

- **Futur** :

Fractionnement possible des matières premières végétales en produits de base et de commodités

- 2013 : fin de la PAC (nouvelles filières pour l'agriculture)
- 2050 : 30 à 40% des produits chimiques proviendront de la biomasse
- 2090 : objectif (DOE) >90%

Valorisation des matières 1ères renouvelables



IV - Utilisation de la catalyse

La catalyse: pilier de la chimie verte

Catalyseur: *substance qui accélère la réaction sans être consommée*

➢ Synthèses optimisées

-moins d'étapes, plus rapides

-moins de réactifs utilisés

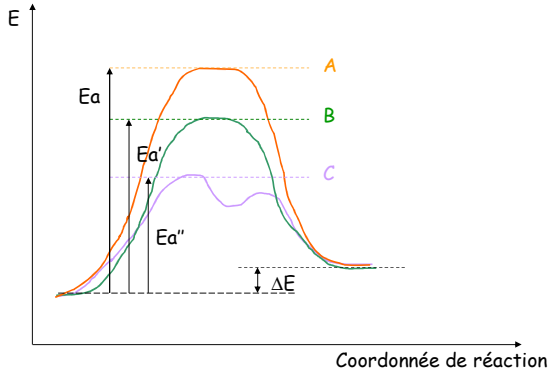
-moins de traitements

-moins coûteuses en énergie

Prix Nobel
2001
2005

Deux prix Nobel ont récemment récompensé les avancées dans le domaine de la catalyse.
Le prix Nobel de chimie 2005 a été attribué à trois chercheurs dont le français Yves Chauvin pour leurs travaux sur la réaction de métathèse des oléfines décrite par le comité Nobel comme **« un pas en avant vers une chimie verte, plus respectueuse de l'environnement »**.

Catalyse et chimie verte

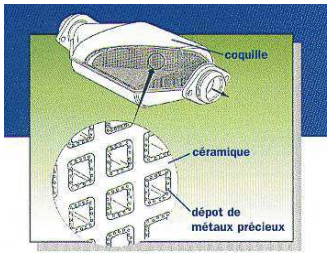


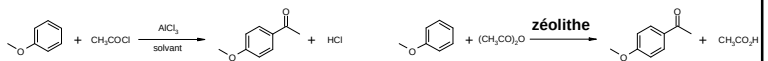
Catalyse et chimie verte

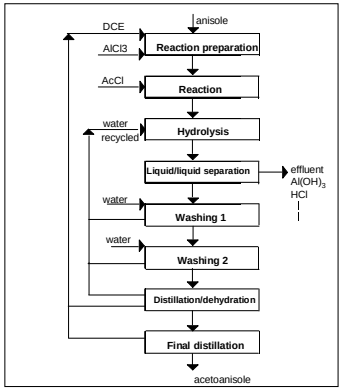
Catalyse hétérogène: cata de surface ou de contact dans 1 phase différente du milieu réactionnel (cata solide et réactifs gazeux ou liquides)

La réaction se produit à la surface du catalyseur (présence de pores pour ↗ la surface de contact)

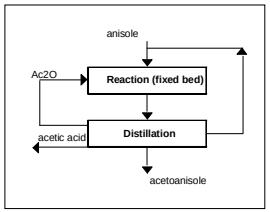
Ex: pots catalytiques







4500 Kg d'effluents / tonne



35 Kg d'effluents / tonne

Catalyse et chimie verte

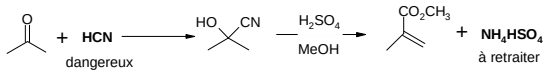
Catalyse homogène: dans la même phase que les réactifs (svt liquide), distribution uniforme.

☺ Réactions rapides et hautement sélectives

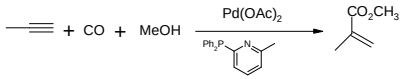
☹ Applications industrielles en chimie fine

Voies d'accès au méthyl méthacrylate:

ancienne voie de synthèse:



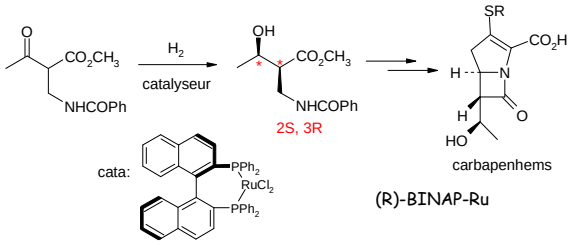
nouvelle voie de synthèse:



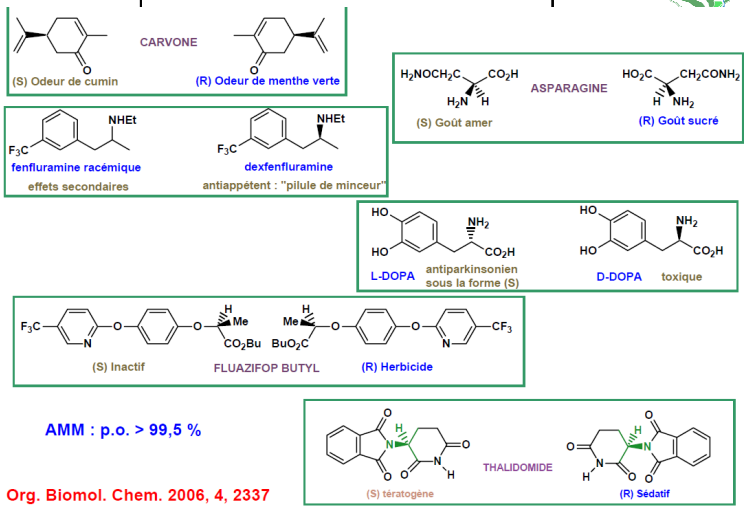
Catalyse et chimie verte

Catalyse asymmétrique: efficace pour produire des cpsés énantiomériquement purs.

Principales applications dans l'industrie pharmaceutique et des parfums



Dévelopment des chirotechnologies



AMM : p.o. > 99,5 %

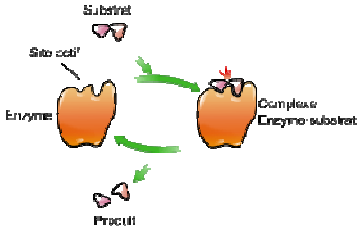
Org. Biomol. Chem. 2006, 4, 2337

Catalyse et chimie verte

Biocatalyse: utilisation de catalyseurs naturels ou génétiquement modifiés (enzymes) pour effectuer des transformations chimiques sur des composés organiques. Enzymes isolées ou en cellules entières.

Les enzymes sont des protéines complexes de 100 à 400 aa.

Leur structure tridimensionnelle importante ➢garde le(s) site(s) actif(s) dans la bonne orientation pour recevoir le substrat (conditions douces).



Catalyse et chimie verte

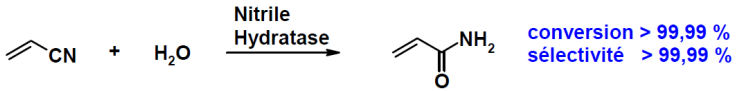
Biocatalyse

Enzymes communément utilisées en synthèse organique:

Esterases, lipases	hydrolyse/formation d'ester
Amidases (protéases, acylases)	hydrolyse/formation d'amide
Dehydrogénases	redox d'alcools et cétones
Oxidases (mono- et dioxygénases)	oxydation
Peroxidases	oxydation, epoxydation
Kinases	phosphorylation (ATP-dependant)
Aldolases, transcétolases	aldolisation (C-C)
Glycosidases, glycosyltransférases	formation de liaisons glycosidiques
Phosphorylases, phosphatases	formation/hydrolyse de phosphate
Sulfotransférases	formation d'ester de sulfate
Transaminases	synthèse d'amino acides (C-N)
Hydrolases	hydrolyse
Isomérases, lyases, hydratases	isomérisation, addition, élimination

Biocatalyse

Procédé biocatalytique de production de l'acrylamide : MITSUBISHI



conversion > 99,99 %
sélectivité > 99,99 %

- 2006 :100000 tonnes par an
- Plus simple que le procédé chimique au Cu
- Immobilisation de cellules entières de *Rhodococcus.rhodocrousJ1hydratase (E.C.4.2.1.84)*
- Conditions plus douces (5°C)
- Pas de nécéssité d'inhibiteur de polymérisation
- Productivité améliorée (>400g.L^{-1}.h^{-1})
- Produit de meilleure qualité

V - Réduction des COV

Les COV

Définition

Composé organique volatil ayant une pression de vapeur de 0,01 kPa ou plus à une température de 293,15K ou ayant une volatilité correspondante dans les conditions d'utilisation particulières. […]

Ils ont un effet direct sur la santé, gaz à effet de serre.

Classification des COV selon leur température d'ébullition

✓Très volatils Teb < [50 - 100 °C]
✓Volatils [50 - 100 °C] <Teb> [240 - 260 °C]
✓Semi-volatils [240 - 260 °C] <Teb> [380 - 400 °C]

Propriétés de quelques COV (cf. tableau)

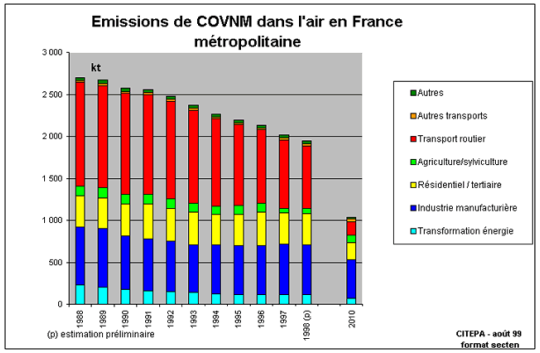
Tableau 2. Propriétés de quelques COV

Famille chimique	Nom usuel	Nom IUPAC *	N° CAS **	Formule brute	Pression de vapeur saturante (Pa à 20°C)	Apparence
Alcanes	éthane	éthane	74-84-0	C_2H_6	$3,85.10^5$	Gaz incolore, inodore
	n-hexane	n-hexane	110-54-3	C_6H_{14}	$1,6.10^4$	Liquide incolore, odeur caractéristique
Alcènes	éthylène	éthène	74-85-1	C_2H_4	$8,1.10^6$	Gaz incolore, odeur caractéristique
	propylène	propène	115-07-1	C_3H_6	$1,16.10^6$	Gaz incolore
	1,3-butadiène	1,3-butadiène	106-99-0	C_4H_6		Gaz incolore
Alcynes	acétylène	éthyne	74-86-2	C_2H_2	$4,5.10^6$	Gaz incolore, inodore
Alcools	méthanol	méthanol	67-56-1	CH_4O	$1,23.10^4$	Liquide incolore, odeur agréable
	éthylène glycol	éthane-1,2-diol	107-21-1	$C_2H_6O_2$	7	Liquide incolore
	propylène glycol	propane-1,2-diol	57-55-6	$C_3H_8O_2$	10,6	Liquide incolore, inodore
Dérivés aminés	éthylamine	éthylamine	75-04-7	C_2H_7N	$1,17.10^5$	Gaz incolore, forte odeur
Dérivés nitrés	2-nitropropane	2-nitropropane	79-46-9	$C_3H_7NO_2$	$1,73.10^3$	Liquide incolore, odeur agréable
Hydrocarbures halogénés	dichlorométhane	dichlorométhane	75-09-2	CH_2Cl_2	$4,65.10^4$	Liquide incolore, odeur éthérée
	trichlorométhane	trichlorométhane	67-66-3	$CHCl_3$	$2,13.10^4$	Liquide incolore, odeur éthérée
	trichloroéthylène	trichloroéthylène	79-01-6	C_2HCl_3	$8,6.10^3$	Liquide incolore, odeur douce
	tétrachloroéthylène	tétrachloroéthylène	127-18-4	C_2Cl_4	$1,9.10^3$	Liquide incolore, odeur caractéristique
Hydrocarbures aromatiques	benzène	benzène	71-43-2	C_6H_6	$9,97.10^3$	Liquide incolore, odeur aromatique
	toluène	méthylbenzène	108-88-3	C_7H_8	$3,8.10^3$	Liquide incolore, odeur caractéristique
	o- xylène	1,2-diméthylbenzène	95-47-6	C_8H_{10}	663	Liquide incolore, odeur caractéristique
	éthylbenzène	éthylbenzène	100-41-4	C_8H_{10}	900	Liquide incolore, odeur aromatique
Aldéhydes	formaldéhyde	méthanal	50-00-0	CH_2O	$4,4.10^2$	Gaz incolore, odeur piquante
	acétaldéhyde	éthanal	75-07-0	C_2H_4O	$1,01.10^5$	Liquide incolore, odeur fruitée
Cétones	acétone	2-propanone	67-64-1	C_3H_6O	$2,4.10^4$	Liquide incolore, odeur suave
Ethers	éther éthylique	éther diéthylique	60-29-7	$C_4H_{10}O$	$5,89.10^4$	Liquide incolore, odeur sucrée piquante
	éthylène glycol n-butyl éther (EGBE)	2-butoxyéthanol	111-76-2	$C_6H_{14}O_2$	100	Liquide incolore, odeur éthérée
Esters	acétate de méthyle	éthanoate de méthyle	79-20-9	$C_3H_6O_2$	$2,17.10^4$	Liquide incolore, odeur fruitée

Sources d'émissions des COV

Industrie chimique: solvants ➢dissolution, homogénéisation des mélanges réactionnels, extraction, recristallisation, absorption d'NRJ pour réactions exothermiques

Pb: toxicité des COV (santé, environnement) ⇒ mesures de contrôle pour diminuer leur émission



Alternatives à l'utilisation de solvants organiques

Qu'est-ce qu'un solvant VERT ?

✓ FAIBLE TOXICITE
✓ FACILE A RECYCLER (pas de besoin de stockage)
✓ FACILE A ELIMINER DU PRODUIT FINAL
✓ FAIBLE REACTIVITE

Quelles sont les solutions?

- **Procédés sans solvant**
- **Fluide supercritique**
- **L'eau comme solvant**
- **Liquides ioniques**
- **Solvants fluorés biphasiques**
- **…**

Alternatives à l'utilisation de solvants organiques

Contraintes techniques:

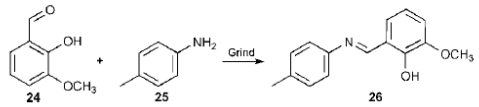
Certains process sans solvant peuvent conduire à de mauvais transferts de chaleur ou de masse, à des limitations de viscosité

⇨ néc. excès d'NRJ

⇨ Production de produits moins purs (néc. + de slvt dans les étapes de purif)

Alternatives à l'utilisation de solvants organiques

Exemple de synthèse sans solvant:



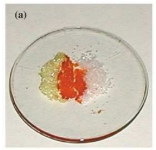


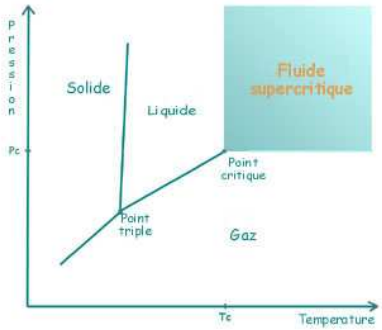
Fig. 7 Photographs of liquid phase formed upon mixing of *o*-vanillin and *p*-toluidine. (a) Pale yellow crystalline *o*-vanillin (left) and white crystalline *p*-toluidine (right) form an orange liquid phase upon contact. (b) The orange

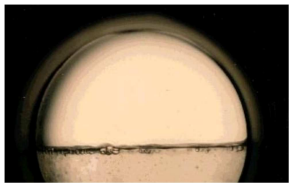
"Recent Advances in Solventless Organic Reactions: Towards Benign Synthesis with Remarkable Versatility." G. W. V. Cave, C. L. Raston and J. L. Scotta, *Chem. Commun.*, **2001**, *21*, 2159-2169.

Alternatives à l'utilisation de solvants organiques

Utilisation de fluides supercritiques:

Un fluide est dit supercritique lorsqu'il est placé dans des conditions de température et de pression au-delà de son point critique.

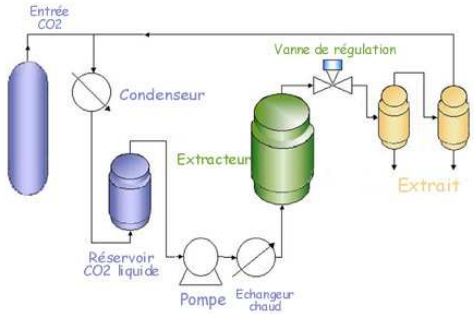




Alternatives à l'utilisation de solvants organiques

Application du scCO_2: extraction solide / fluide

(ex: décaféination du café ou du thé)



Alternatives à l'utilisation de solvants organiques

L'eau: un solvant vert?

Avantages

Non toxique

Source abondante

Peu coûteux

Non inflammable

Capacité calorifique spécifique (réactions exothermiques mieux contrôlées)

Inconvénients

distillation coûteuse en NRJ

effluents difficiles à retraiter

capacité calorifique spécifique (chauffage et refroidissement lents)

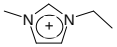
61

Alternatives à l'utilisation de solvants organiques

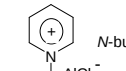
Utilisation de <u>liquides ioniques</u>

= matériau ionique liquide à basse T°C (< 100°C)

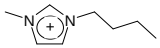
= sels d'onium (composés formés par l'association d'un anion et d'un cation, dont l'un des deux au moins est organique)



1-ethyl-3-methylimidazolium chloride - aluminium (III) chloride ([emim]$AlCl_4$)



N-butylpyridinium - aluminium (III) chloride ([*N*Bupy]$AlCl_4$)



1-butyl-3-methylimidazolium chloride -hexafluorophosphate ([bmim]PF_6)

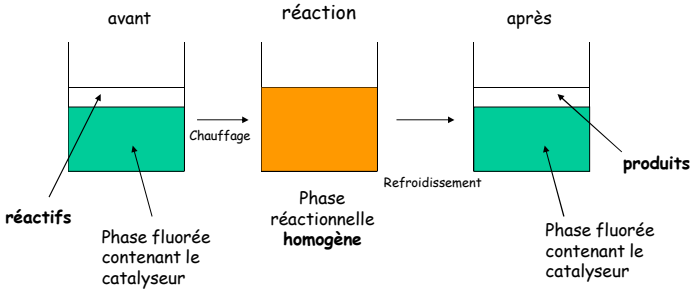
62

Alternatives à l'utilisation de solvants organiques

Utilisation de <u>solvants fluorés biphasiques</u>

= solvants hydrocarbonés perfluorés non miscibles

avec les solvants organiques à t.a. (« 3 phases » liquides)



"Practical Approaches to Green Solvents", J. M. DeSimone, *Science*, **2002**, *297*, 799-803.

63

VI - Technologies nouvelles, intensification des procédés et sources d'NRJ alternatives

64

Technologies nouvelles et sources d'NRJ alternatives

Photochimie:

Ea apportée par une source de photons (UV et visible : λ= 50-800 nm)

Pré-requis: molécules doivent absorber la lumière

Transitions électroniques des e- de valence des molécules

Micro-ondes:

Nécessité d'un milieu polaire

Transitions rotationnelles

Sonochimie:

Utilisation des ultrasons (ν=20-100 kHz)

Cavitation acoustique → très hautes T°C et pressions locales

Sources d'NRJ plus efficaces, plus propres, complémentaires

NRJ focalisée ➢ flux optimisés

65

La chimie face au développement durable et aux enjeux de la planète

- Protéger la couche d'ozone (remplacement des CFC)
- Réchauffement climatique (utilisation du CO_2, NRJ renouvelables)
- Biodiversité (chimie analytique)
- Réduction des déchets, procédures de valorisation
- Qualité de l'air (COV)
- Ressources en eau (élimination des métaux lourds, désinfection simplifiée)
- Préservation des sols (biodégradabilité)
- Economies d'NRJ (bâtiment économe, piles)
- Sources de carbone alternatives (biomasse)
- Alimentation (détection des mycotoxines, protection des cultures…)

66