MASTER 2 PEPS *2020 – 2021*

UE PEPS1 « Polluants : des sources aux traitements »

Traitements des pollutions

Principes et applications

Pierre Tardiveau
Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas (LPGP)

SOMMAIRE

I - Contexte de la lutte contre les pollutions
- *I.1 - Prévention et réglementation*
- *I.2 - Procédés et filières de traitement*
- *I.3 - Coût de la dépollution*

II - Traitement de l'air
- *II.1 - Traitement des rejets atmosphériques industriels*
- *II.2 - Traitement des gaz d'échappement*

III – Traitement de l'eau
- *III.1 - Assainissement des eaux urbaines*
- *III.2 - Stations d'épuration*
- *III.3 - Assainissement des eaux résiduaires industrielles*
- *III.4 - Traitement des boues issues de l'épuration*

IV - Traitement des sols contaminés

V - Traitement et gestion des déchets

I – Contexte de la lutte contre les pollutions

La lutte contre les pollutions se fait sur plusieurs niveaux :

- ✓ **Juridique** : définition de normes de rejets de polluants de plus en plus sévères actions de prévention, incitations fiscales, taxation…
- ✓ **Technique** : mise en place de technologies « propres » et de procédés de dépollution
- ✓ **Economique** : à quel prix ? la lutte contre les pollutions est-elle un frein au développement économique ?
- ✓ **Sociétal** : changement des modes de déplacement, énergies renouvelables, tri, lutte contre le gaspillage, achat responsable …

***Extrait de l'Arrêté du 2 février 1998** : Les installations (ICPE soumises à autorisation) sont conçues de manière à limiter les émissions polluantes dans l'environnement, notamment par la mise en œuvre de technologies propres, le développement de techniques de valorisation, la collecte sélective et le traitement des effluents et déchets en fonction de leurs caractéristiques et la réduction des quantités rejetées (article 2).*

I1 - Prévention et réglementation

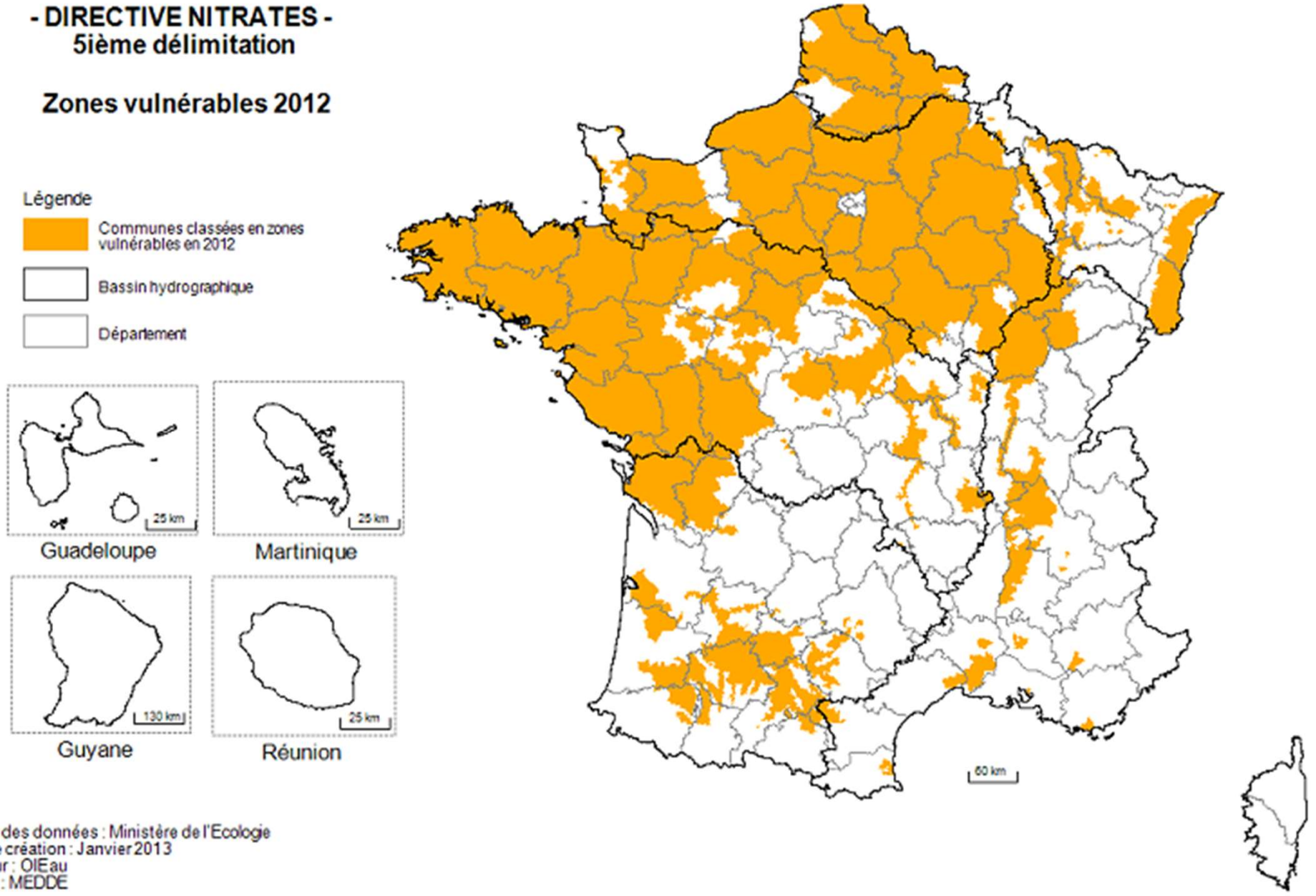
Les textes juridiques (https://aida.ineris.fr/) définissent la façon de procéder avec les substances nocives et précisent les seuils de rejets à ne pas dépasser.

- Valeurs limites des effluents gazeux dans l'atmosphère
- Valeurs limites des polluants des eaux de surface
- Conditions de rejet des effluents
- Modalités de mesure et de surveillance des émissions

Extrait de l'arrêté du 2/2/1998
concernant les rejets des ICPE soumise à autorisation

- *valeurs limites d'émissions atmosphériques (article 27)*
- *seuils de débit nécessitant une surveillance permanente des émissions (article 59)*

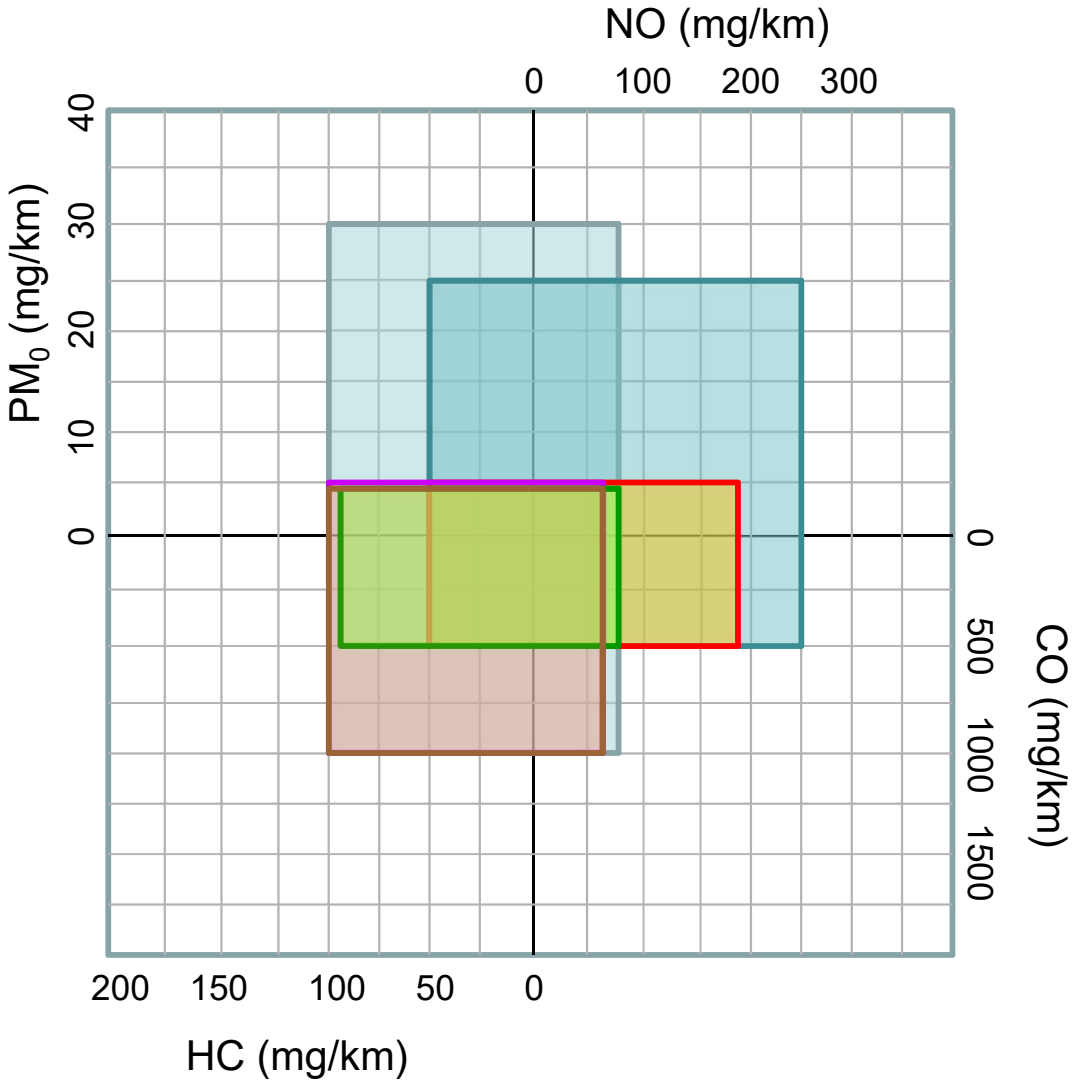
Polluants	Seuil de mesure	Débit massique	Valeur limite
Poussières	50 kg/h	< 1 kg/h	100 mg/m^3
		> 1 kg/h	50 mg/m^3
Monoxyde de carbone	50 kg/h	Par arrêté préfectoral	
Dioxyde de soufre	150 kg/h	> 25 kg/h	300 mg/m^3
Oxydes d'azote	150 kg/h	> 25 kg/h	500 mg/m^3
COV	15 kg/h	> 2 kg/h	110 mg/m^3


- DIRECTIVE NITRATES -
5ième délimitation
Zones vulnérables 2012
Légende
Communes classées en zones vulnérables en 2012
Bassin hydrographique
Département
25 km
Guadeloupe
25 km
Martinique
130 km
Guyane
25 km
Réunion
60 km
Source des données : Ministère de l'Ecologie
Date de création : Janvier 2013
Créateur : OIEau
Editeur : MEDDE

I1 - Prévention et réglementation - Exemple

<u>Normes européennes d'émissions des véhicules légers</u>

- Règlement CE du 20 juin 2007 modifié par celui du 29 mai 2012
- S'applique aux véhicules neufs
- Normes différentes selon type de moteur et de véhicule
- Changement de cycle de test à partir de sept 2017 (WLTC – RDE à la place de NEDC)
- Problème lié aux particules fines (introduction d'un seuil sur le nombre de particules : 6.10^{11} /km)



I1 - Prévention et réglementation

La France s'appuie sur les textes juridiques pour définir une politique cohérente de lutte contre les pollutions :

- ✓ Définition de plans d'actions nationaux et régionaux
- ✓ Définition des mesures techniques de prévention et de limitation de la pollution
- ✓ Obligation de traitement si valeurs seuils d'émission dépassée, de mise en conformité,…
- ✓ Contrôles et sanctions
- ✓ Dispositions financières et fiscales

Tous les textes législatifs reposent sur quatre principes fondamentaux :

- ✓ Principe de précaution (et prévention)
- ✓ Principe du pollueur-payeur / Responsabilité Elargie du Producteur (déchets)
- ✓ Principe de participation (coopération)
- ✓ Principe de solidarité écologique (approche globale)

I2 – Procédés et filières de traitement

✓ Traitement « *à la source* » par la mise en place de **technologies propres** et le développement des « **éco-industries** ».

Réduction des rejets polluants par optimisation ou modification importante de la source de pollution.

Recyclage et valorisation des polluants par des techniques de valorisation en aval des sources. Ecologie industrielle.

✓ Traitement « *a posteriori* » par la mise en place de **techniques de traitement des pollutions**.

Coût élevé

Transfert de pollution

} Optimisation des techniques existantes et recherche sur des techniques innovantes.

I2 – Procédés et filières de traitement

Les techniques se distinguent en :

- Techniques **destructives**
- Techniques **récupératives**

Les **principales techniques de traitement** sont :

- ✓ L'adsorption (sur charbon actif, zéolithe,…)
- ✓ L'absorption ou « lavage de gaz »
- ✓ La condensation des polluants peu volatils et le piégeage cryogénique des plus volatils
- ✓ L'oxydation (thermique, catalytique, photo-catalytique, plasma,…) des polluants organiques
- ✓ Les techniques membranaires (électrodialyse, pervaporation, osmose inverse,…)
- ✓ Les procédés chimiques (neutralisation, oxydo-réduction, précipitation, extraction liquide/liquide,…)
- ✓ Le traitement biologique aérobie ou anaérobie des polluants organiques
- ✓ Les procédés mécaniques et électriques de filtration et de séparation des matières en suspension

I2 – Procédés et filières de traitement

Quels sont les **paramètres importants** dans le **choix** et l'**élaboration** d'une technique de traitement ?

✓ **Conditions de génération** de l'effluent polluant :

- pression, température, humidité, pH…
- concentrations, débits…
- paramètres de sécurité : explosivité, corrosivité, toxicité,…
- encombrement, effluent canalisé ou diffus

✓ **Nature et propriétés** du polluant à traiter :

- solide, liquide, gaz, particules,…
- en mélange, pur, …
- composition chimique (organique, minéral,…)
- solubilité, volatilité, réactivité,…

Approche par filière de traitement

✓ **Produits secondaires** et **valorisation**

✓ **Efficacité** de traitement et **coût** (fonctionnement, investissement)

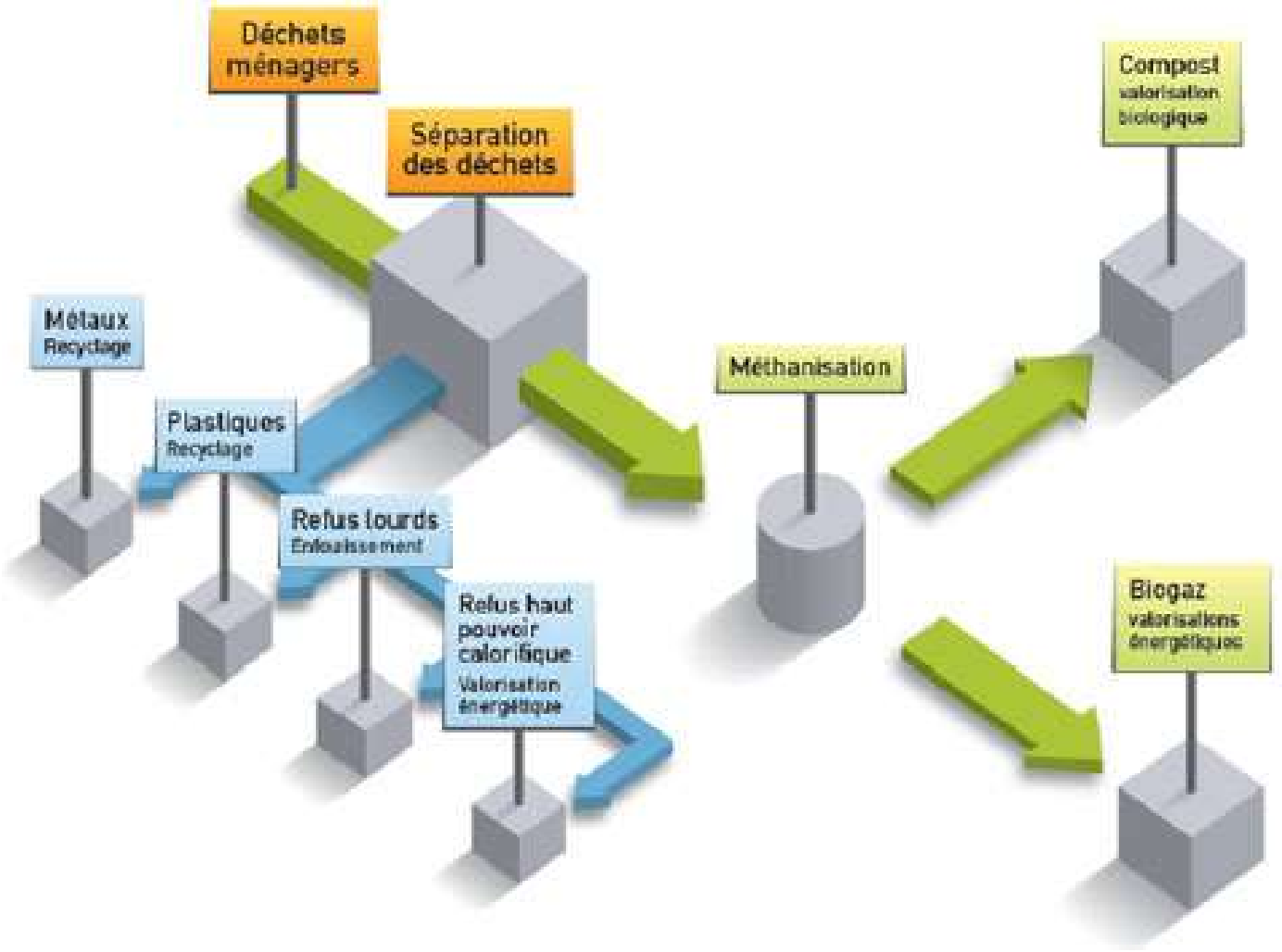
✓ **Souplesse d'aménagement** selon l'évolution des techniques et de la réglementation

I2 – Procédés et filières de traitement

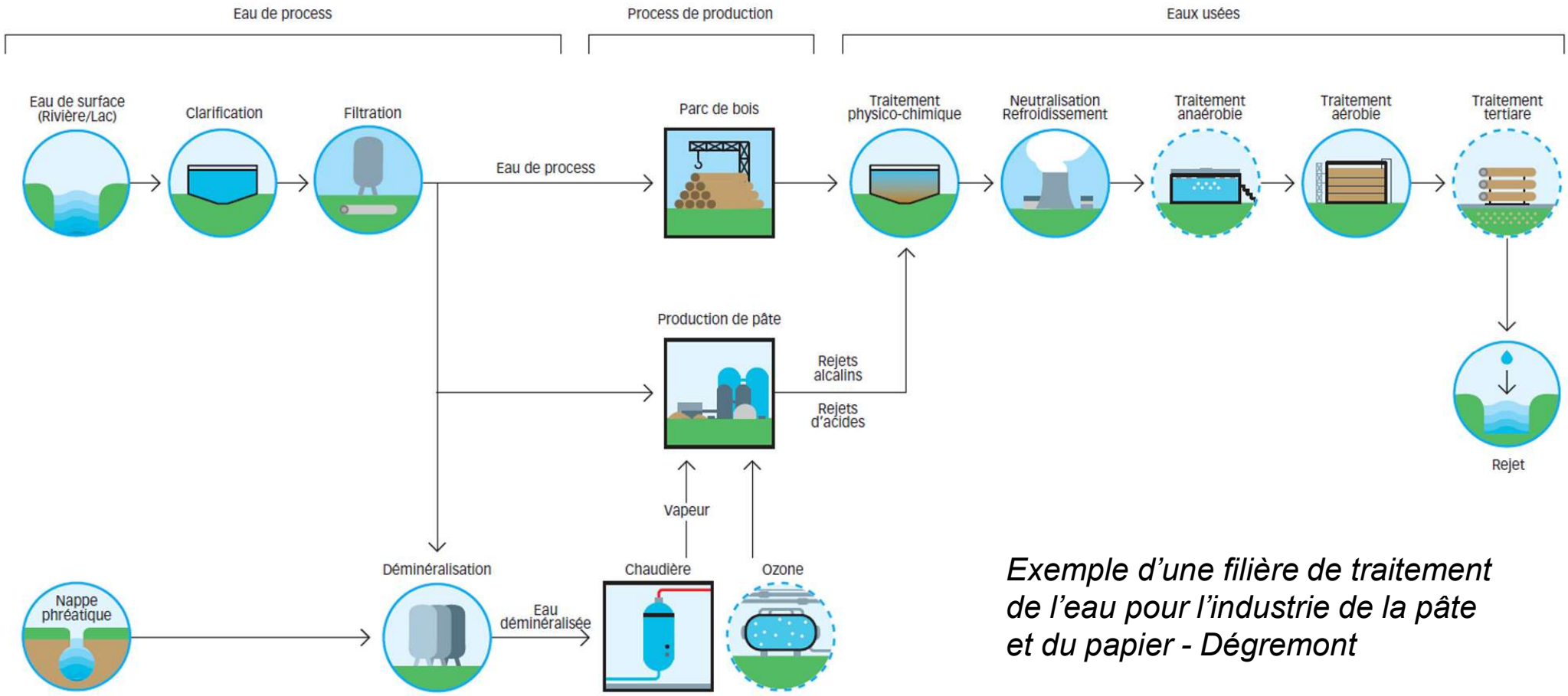
Une **filière de traitement** est un ensemble d'actions et de procédés mis en œuvre de manière cohérente et adaptée pour traiter et/ou valoriser des polluants et des déchets.

Exemple d'une filière de de traitement de déchets ménagers :

- *Collecte*
- *Tri*
- *Recyclage*
- *Valorisation matière*
- *Valorisation énergétique*



I2 – Procédés et filières de traitement



Exemple d'une filière de traitement de l'eau pour l'industrie de la pâte et du papier - Dégremont

I3 – Coût de la dépollution

La définition du coût de la dépollution se base sur le principe de solidarité écologique et la nécessité d'éviter les transferts de pollution :

- ✓ De l'air vers l'eau ou le sol
- ✓ D'un secteur d'activité à un autre
- ✓ D'un pays à l'autre
- ✓ D'une génération à l'autre

Approche par étude d'impacts et ACV

Ce coût net englobe :

- ✓ coûts d'investissements et de fonctionnement (coût opératoire)
- ✓ coûts liés aux activités transversales (formation, communication, R&D, …)
- ✓ perte de compétitivité et baisse de la consommation
- ✓ bénéfices associés à la réduction de la pollution (sanitaire, environnemental,…)

I3 – Coût de la dépollution

Techniquement, tout est possible….à condition d'y mettre le prix!

- ✓ Compromis efficacité de traitement / coût
- ✓ Un bon système de traitement n'est pas à « émission nulle »
- ✓ Émissions polluantes compatibles avec l'environnement et la santé humaine

Le traitement de la pollution coûte-il cher ?

- ✓ Difficulté d'évaluer le coût de dégradation de l'environnement et de la santé mais de plus en plus élevé !
- ✓ Pour un pays, le traitement doit être économiquement viable : dépenses de réduction des pollutions / bénéfices sanitaires et environnementaux
- ✓ Pour une entreprise, l'investissement doit être économiquement rentable

Un exemple intéressant – Etude d'impacts de la réduction d'émissions polluantes dans l'air (programme « A clean air for Europe, Joint Research Center).
https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/JRC92553_Air_policy_CGE.pdf

- ✓ Estimation des coûts et bénéfices économiques associés à la proposition de baisse des plafonds d'émission définis par la directive (EU) 2016/2284.

I3 – Coût de la dépollution – Exemple pour la qualité de l'air

Source : Joint Research Center (EC), 2014

EU-28 Abatement expenditure (million €2010/yr, increase compared to reference)	Reference (yr 2025)	Reference (yr 2030)	B1 (yr 2025)	B2 (yr 2025)	B3 (yr 2025)	B7 (yr 2030)
Agriculture	7701.4	7942.9	66.2	339.9	1420.8	892.2
Electricity supply	9276.5	6845.8	16.4	76.0	263.7	146.7
Ferrous and non ferrous metals	2666.7	2676.2	11.6	104.3	230.4	219.3
Chemical Products	2007.1	2036.9	12.5	36.3	173.0	121.7
Other energy intensive	1507.2	1572.8	14.4	83.1	387.9	255.7
Construction	2745.3	2871.3	0.0	0.9	24.6	20.9
Transport	48620.3	56120.8	0.3	3.0	19.2	4.8
Market Services	1097.9	965.8	13.3	24.0	54.1	35.3
Non Market Services	0.8	0.8	2.2	2.2	3.2	2.9
Water transport	385.3	404.8	1.0	1.4	101.4	104.7
Households	8522.5	8150.4	53.5	418.4	1496.5	1223.1
Total	**89113.5**	**94078.3**	**229.8**	**1208.8**	**4615.4**	**3315.7**

Les scénarios B1, B2, B3 et B7 correspondent respectivement à 25, 50, 75 et 70 % des objectifs maximum de réduction d'impacts sur la santé (évalués sur PM2.5).

Le scénario de référence correspond à la mise en œuvre des politiques de réduction actuelles (2005)

II – Traitement de l'air

Les **principaux rejets**, polluants de l'air à traiter, sont :

- ✓ Les oxydes de soufre (**SOx**) issus de la **combustion**.
- ✓ Les oxydes d'azote **(NOx)** issus de la **combustion du charbon** et des **transports**.
- ✓ Les composés organiques dont :
  - ▪ Les composés organiques volatils (**COV)** issus de la **combustion** et des industries chimiques du textile ou de la peinture : composés aliphatiques, les hydrocarbures, les odeurs …
  - ▪ Les polluants organiques persistants (**POP**): **HAP**, **PCB**, **dioxines et furannes**.
- ✓ Le dioxyde (**CO_2**) et le monoxyde (**CO**) de carbone.
- ✓ Les oxydants (**O_3**, **PAN**,…).
- ✓ Les composés chlorés, fluorés et soufrés (**mercaptans, PFC, HFC…**).
- ✓ Les métaux (Cd, As, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn)
- ✓ Les particules en suspension (**PM10, PM2,5** et **PM1,0**).

Données sur les rejets atmosphériques et qualité de l'air :
http://www.citepa.org/fr/activites/inventaires-des-emissions/secten

II – Traitement de l'air

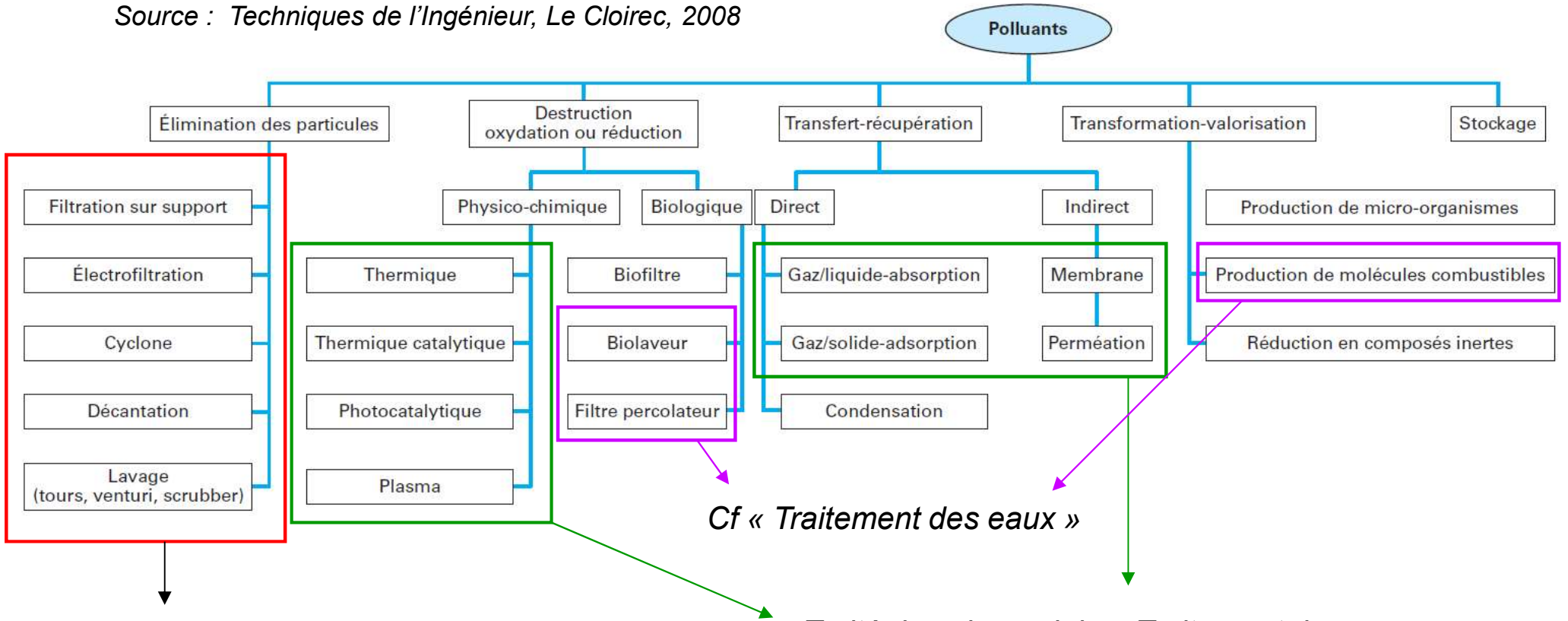
Les principaux textes de loi, programmes, plans d'action sont :

- ✓ **Niveau européen**
  - Directive 2001/81/CE (NEC) fixant des plafonds d'émission nationaux et revue en 2016 par la Directive (EU) 2016/2284
  - Directive 2008/50/CE pour la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe (fixe la stratégie de surveillance de la qualité de l'air)
- ✓ **Droit national**
  - Loi du 30/12/96 sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie (loi LAURE)
  - Loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) du 18/08/2015
- ✓ **Programmes et plans nationaux**
  - Plan d'Urgence pour la Qualité de l'Air (PUQA) lancé en 2013
  - Plan de Réduction des Emissions de Polluants Atmosphériques (PREPA) 2017
- ✓ **Actions régionales et locales**
  - Schémas régionaux Climat Air Energie (SRCAE) pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre
  - Plan de protection de l'atmosphère (PPA)

II – Traitement de l'air

Il faut considérer les émissions à traiter comme des mélanges complexes plus ou moins dilués de particules-aérosols et de molécules dont les propriétés physico-chimiques et biologiques sont très différentes.

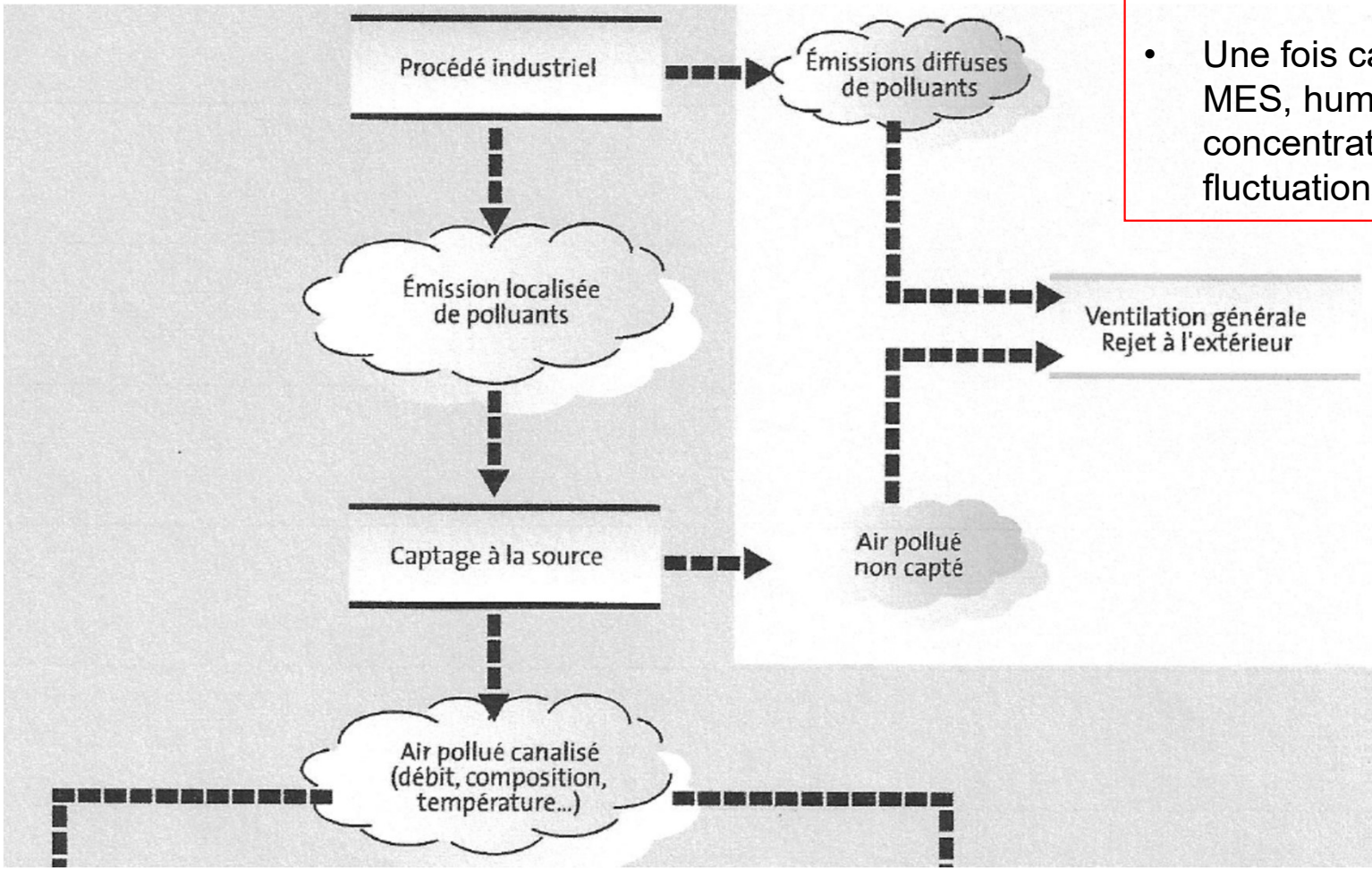
Source : Techniques de l'Ingénieur, Le Cloirec, 2008



II – Traitement de l'air

Démarche préliminaire à tout traitement :

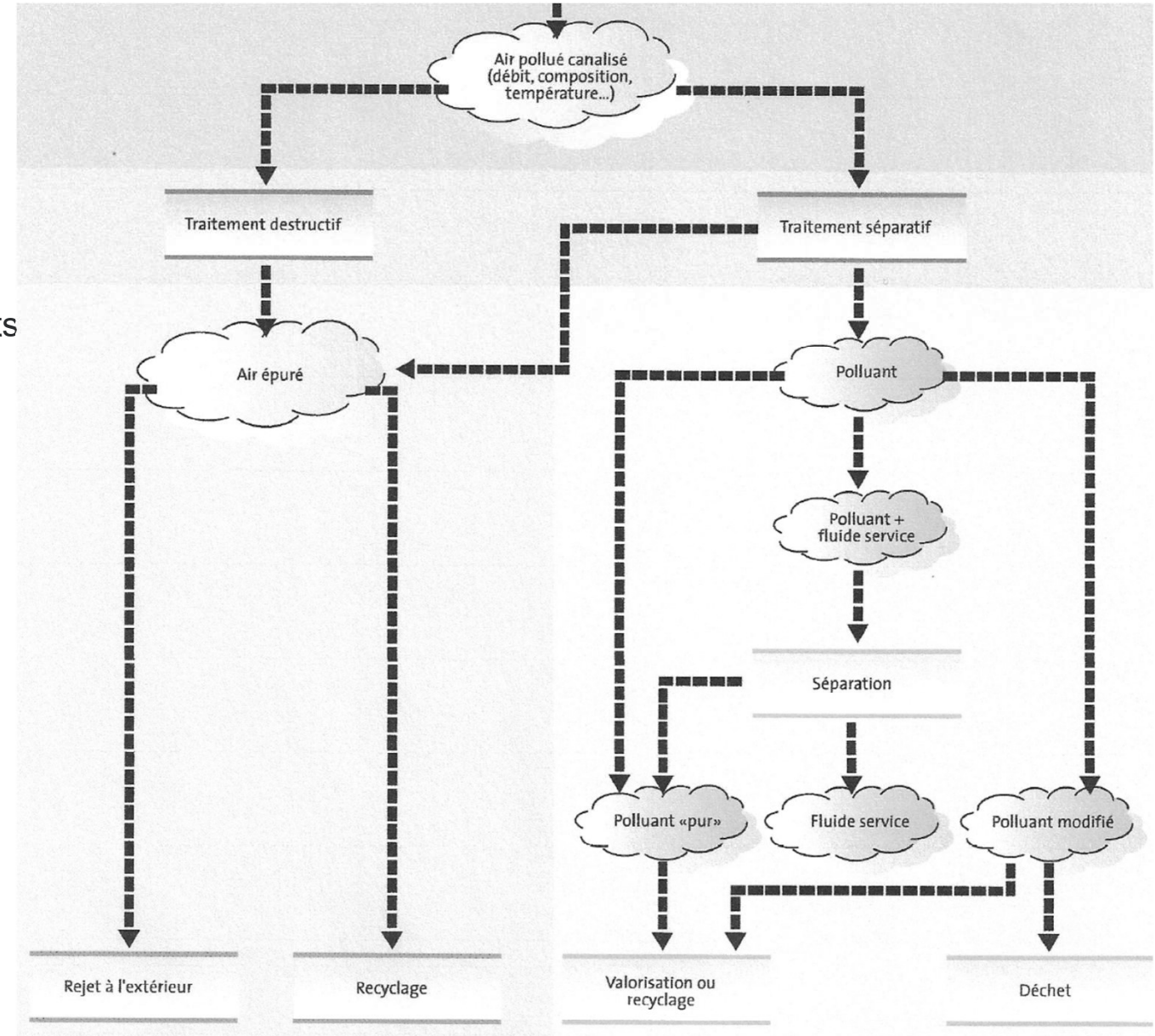
- Captage et mise en place d'une ventilation
- Une fois canalisés, mesure MES, humidité, température, concentration, débit (et fluctuations).



II – Traitement de l'air

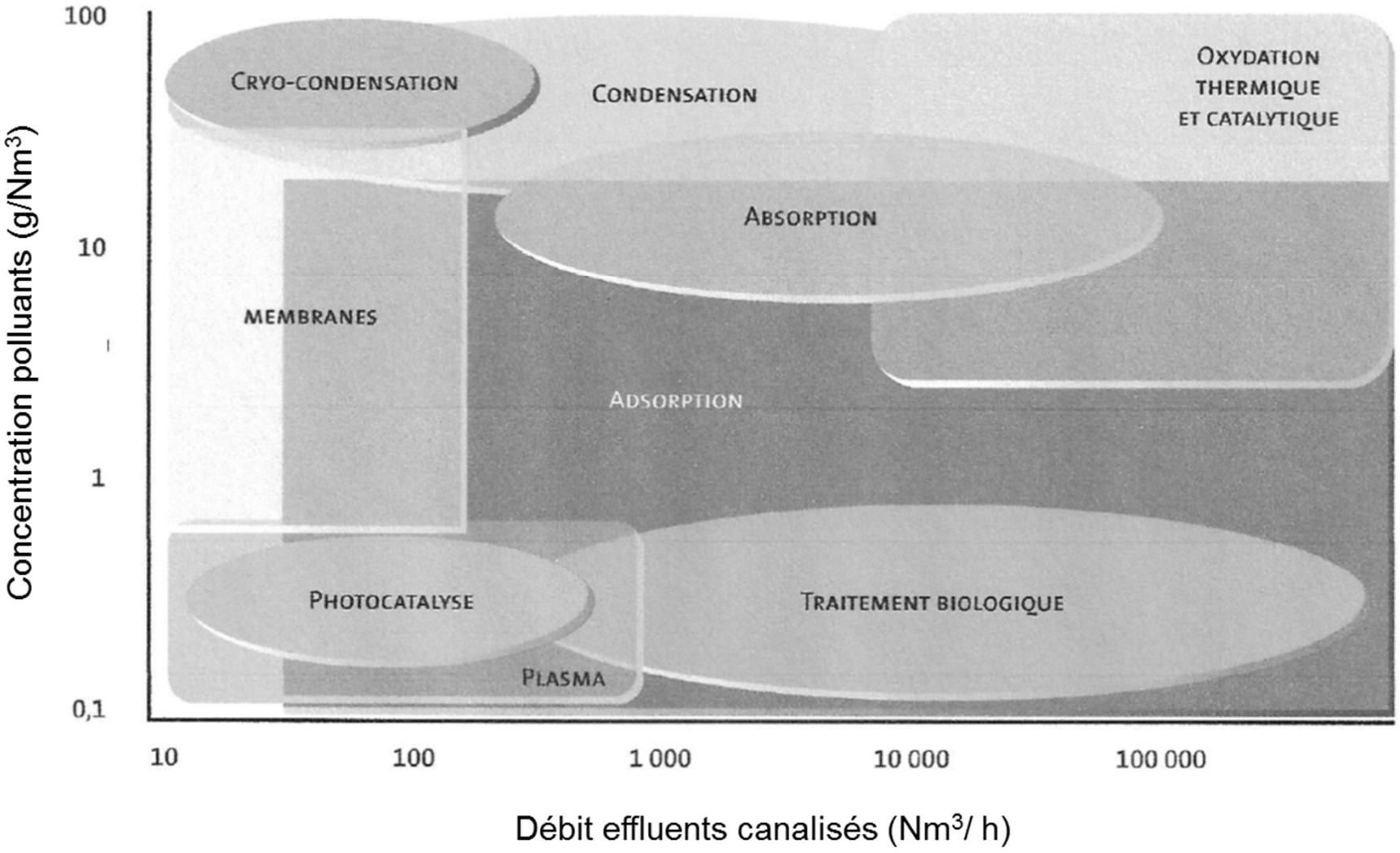
Choix du type de traitement :

Quels critères prendre en compte pour mettre en place de la récupération de polluants au lieu d'un procédé de destruction?



II – Traitement de l'air

Choix du type de traitement selon la concentration et le débit de l'effluent :



II.1 – Traitement des rejets atmosphériques industriels

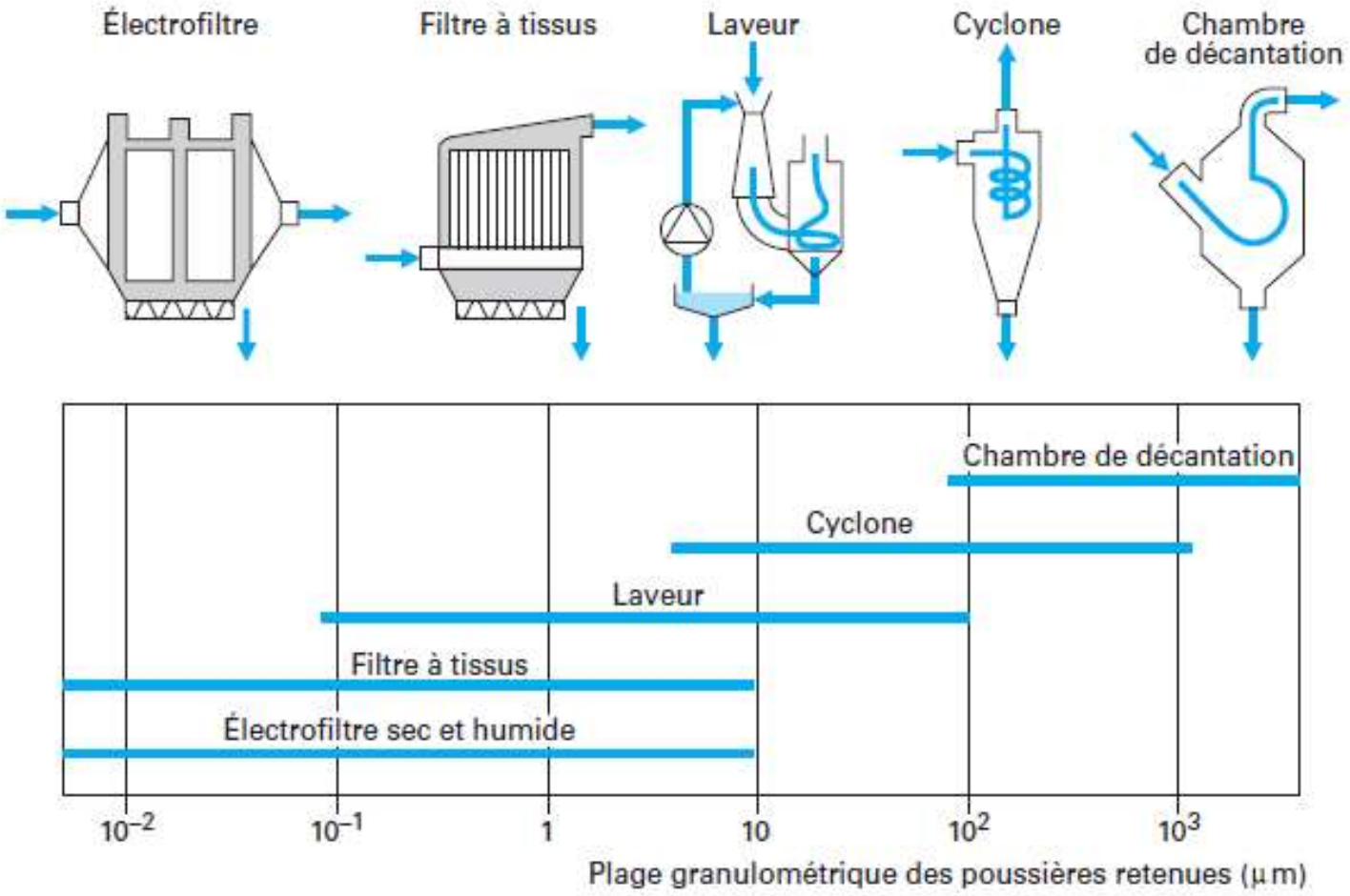
Polluants	Flux massique total	Concentration maximale admissible ($mg \cdot m^{-3}$) (sauf spécifié)	Observations
Poussières	$\leq 1\ kg \cdot h^{-1}$ $> 1\ kg \cdot h^{-1}$	100 40	
Métaux - Métalloïdes			
Cadmium, mercure, thallium	$> 1\ g \cdot h^{-1}$	0,2	Concentration totale (Cd + Hg + Tl)
Arsenic, sélénium, tellure	$> 5\ g \cdot h^{-1}$	1	Concentration totale (As + Se, Te)
Oxyde de soufre	$> 25\ kg \cdot h^{-1}$	300	Exprimé en SO_2
Oxyde d'azote (sauf N_2O)	$> 25\ kg \cdot h^{-1}$	500	Exprimé en NO_2
Protoxyde d'azote (N_2O)			Valeurs limites précisées par arrêté préfectoral
Monoxyde de carbone			Valeurs limites précisées par arrêté préfectoral
Composés organiques volatils non méthaniques (COV_{NM})	$> 2\ kg \cdot h^{-1}$	110	
	$> 2\ kg \cdot h^{-1}$		Utilisation d'une oxydation thermique
		20	Rendement < 98 %
		50	Rendement > 98 %
	$> 0,1\ kg \cdot h^{-1}$	20	Composés listés en annexe III de l'arrêté du 2 février 1998
Mélange de COV_{NM}		110	Ensemble des composés
		20	Ensemble des composés listés en annexe III de l'arrêté du 2 février 1998
Odeurs			Débit d'odeurs précisé par arrêté préfectoral
Ammoniac	$> 0,1\ kg \cdot h^{-1}$	50	
Dioxines et furannes		0,1 ng ITeq $\cdot Nm^{-3}$ (1)	

(1) ITeq International Toxic equivalent.

Source : Techniques de l'Ingénieur j3921 (2005)

II.1 – Traitement des rejets atmosphériques industriels

Élimination de particules / Dépoussiérage : jusqu'à quelle limite peut-on filtrer?



II.1 – Traitement des rejets atmosphériques industriels

Traitement des SOx (désulfuration des gaz acides) : une combinaison de techniques :

- Séparation chimique (neutralisation) ou physique (adsorption)
- Séparation mécanique, électrique, par lavage

Rendement dépendant du rapport Ca/S (entre 1 et 4)

Voie humide	Lavage par un lait de chaux ou une suspension de carbonate de calcium
	Lavage par une solution ammoniacale
Voie semi-sèche	Réaction dans une tour d'absorption avec un agent neutralisant atomisé (dissous dans l'eau ou mis en suspension)
Voie sèche	Adsorption sur des agents neutralisants solides (chaux éteinte ou bicarbonate du sodium) Injection d'agents neutralisants solides ($CaCO_3$) dans le foyer des chaudières
	Adsorption sur charbon actif

Oxydation de SO_2 sous forme de gypse $CaSO_4.2H_2O$:

$$Ca(OH)_2 + SO_2 + 1/2O_2 \Leftrightarrow CaSO_4 + H_2O$$

$$CaO + SO_2 + 1/2O_2 \Leftrightarrow CaSO_4$$

$$CaCO_3 \Leftrightarrow CaO + CO_2 \quad \text{et} \quad CaO + SO_2 + 1/2O_2 \Leftrightarrow CaSO_4$$

II.1 – Traitement des rejets atmosphériques industriels

Traitement des NOx (DeNOx) : réaction avec l'ammoniac NH_3

Les oxydes d'azote NO et NO_2 sont réduits par réaction avec NH_3 en présence d'oxygène pour former de l'azote gazeux. On distingue deux types de procédés :

- **Réduction Non Catalytique Sélective** (SNCR)

NH_3 injecté dans la chambre de combustion entre 800 et 1050 °C :

$$\begin{cases} 4NO + 4NH_3 + O_2 \rightarrow 4N_2 + 6H_2O \\ 4NH_3 + 3O_2 \rightarrow 2N_2 + 6H_2O \\ 4NH_3 + 5O_2 \rightarrow 4NO + 6H_2O \end{cases}$$

Rendement de dénitrification jusqu'à 40-45 % (problème de température basse aux parois, imperfections du mélange)

- **Réduction Catalytique Sélective** (SCR)

Permet de fonctionner à plus basse température (300 à 400 °C) en utilisant des catalyseurs de type V_2O_5, WO_3,TiO_2.

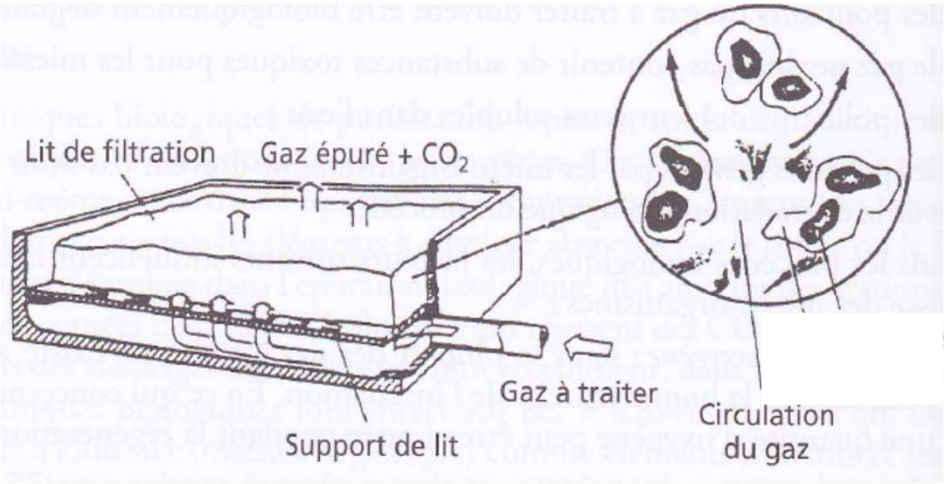
II.1 – Traitement des rejets atmosphériques industriels

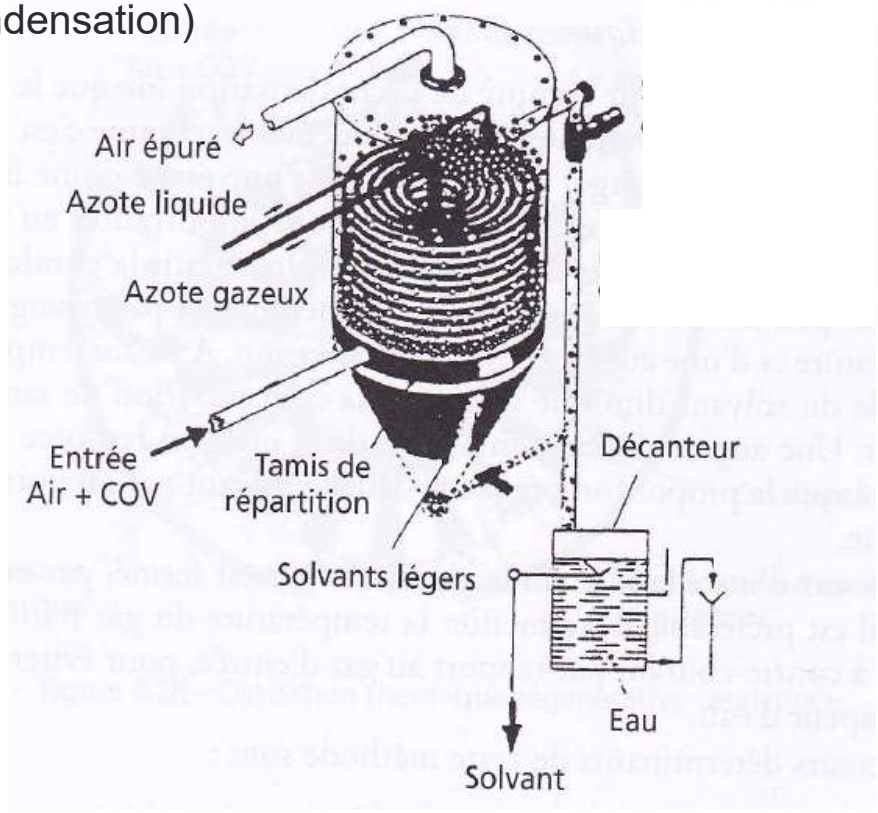
Traitement des Composés Organiques Volatils : de nombreux procédés de traitement selon débit, concentration et nature des mélanges gazeux

Essentiellement, il s'agira de :

- Techniques destructives (incinération, traitements biologiques)
- Techniques de transfert (absorption et adsorption)
- Techniques de changement de phase (condensation)

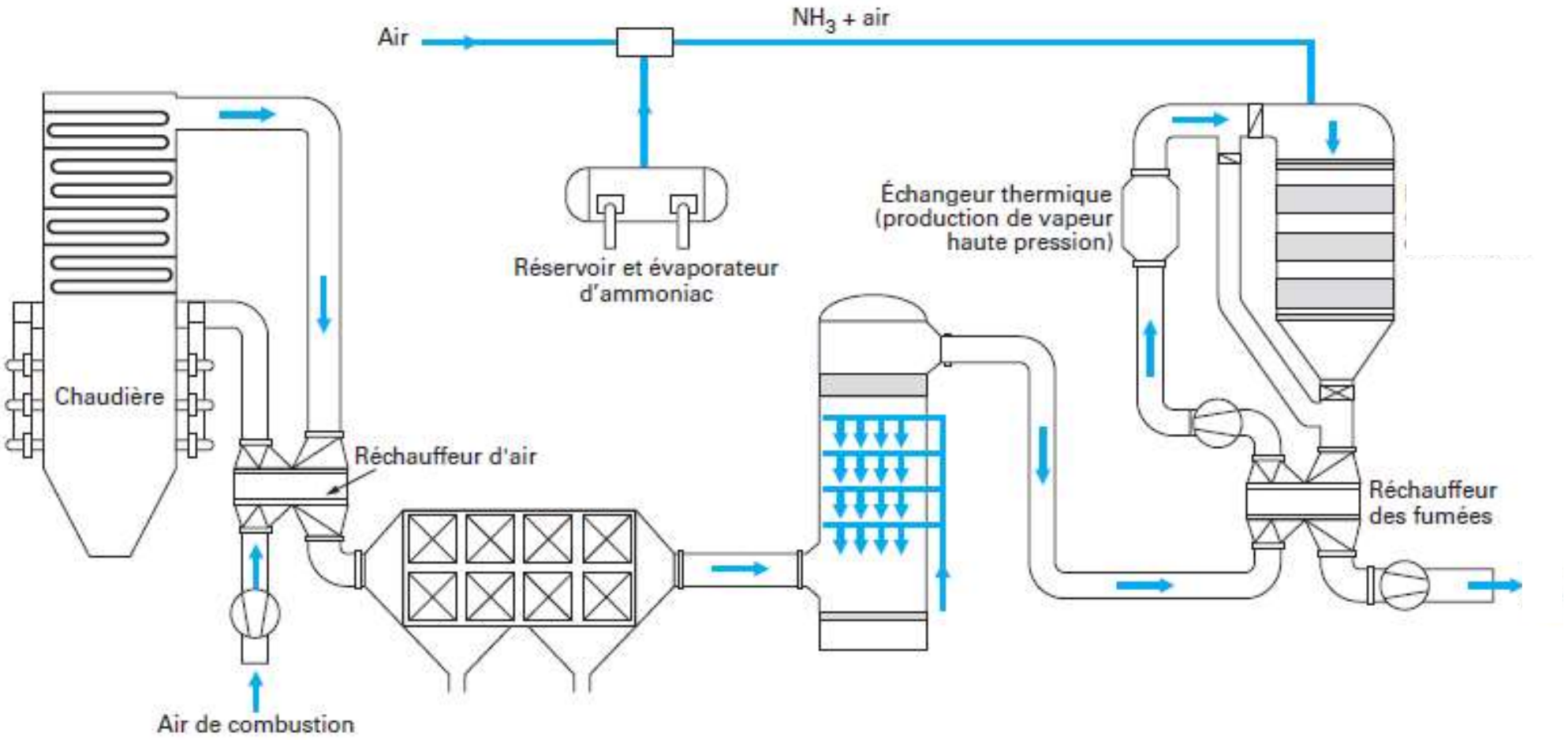
Quelles sont ces techniques ?





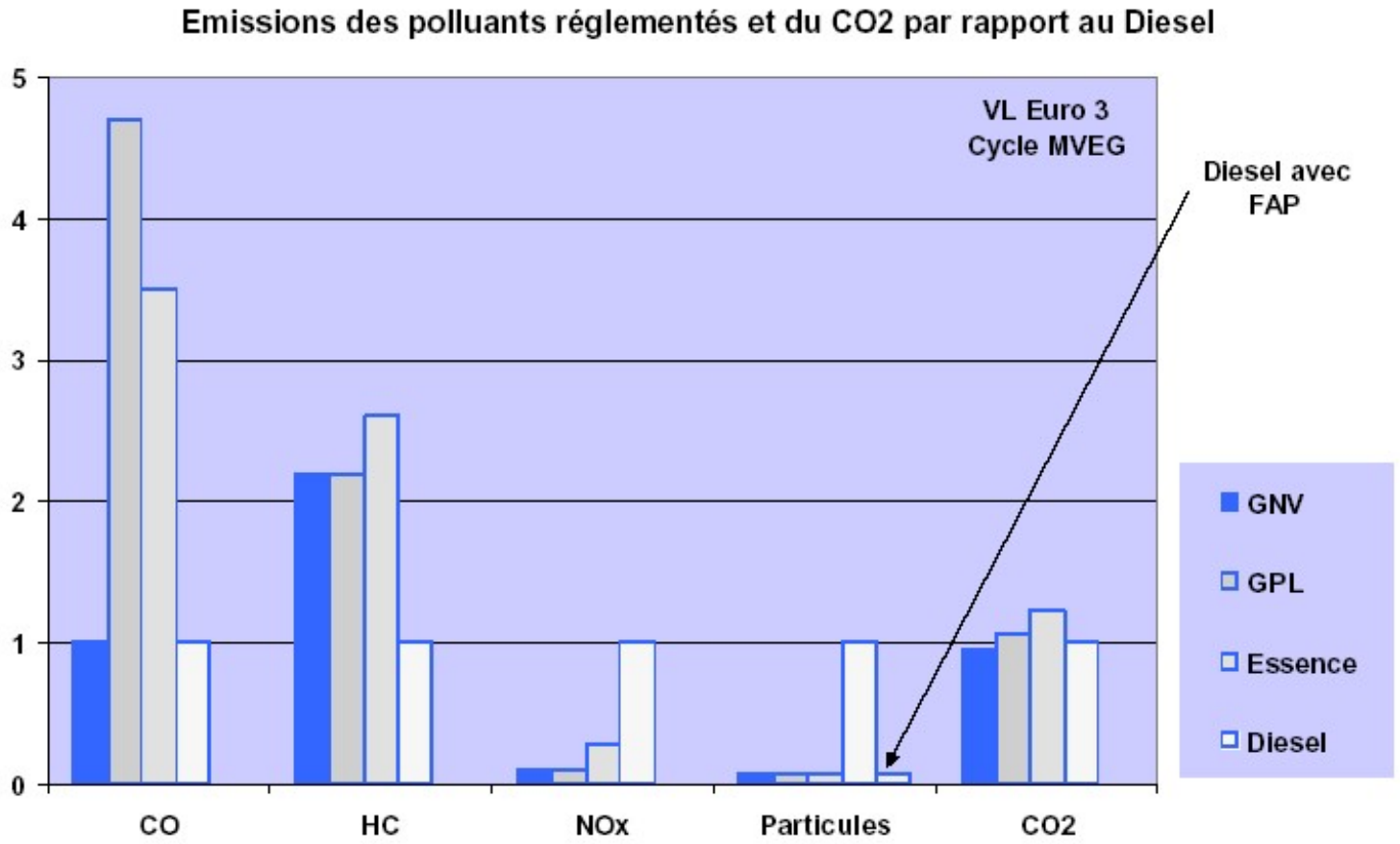
II.1 – Traitement des rejets atmosphériques industriels

Identifier les différents éléments de cette filière de traitement et les polluants traités :



II.2 – Traitement des gaz d'échappement

Composition des gaz d'échappement : **CO** (15 % des émissions anthropiques en France) **CO_2** (35 %), **NOx** (50 %), **particules** (5 %), **COV et HC** (10 %), **SO_2** (< 1 %)



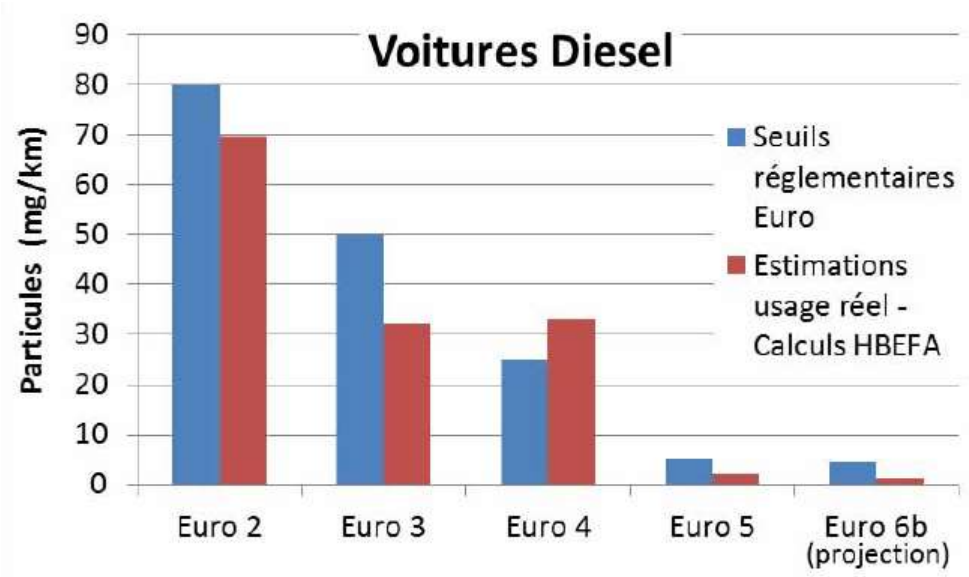
(sources : Ademe, 2005 et CITEPA, 2015)

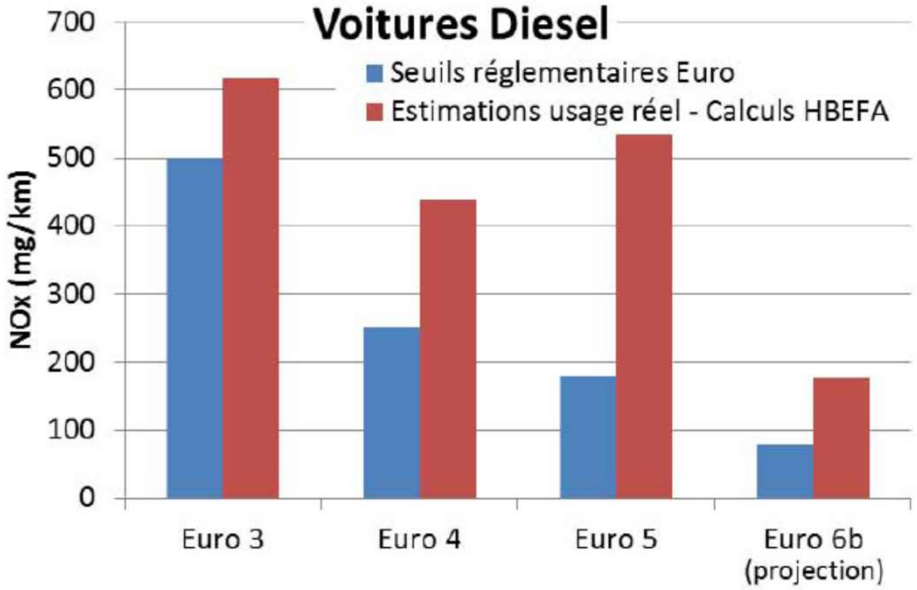
II.2 – Traitement des gaz d'échappement

Composition des gaz d'échappement :

NOx (57 % des émissions anthropiques en France en 2015),

CO_2 (37 %), **CO** (13 %), **PM2.5** (16 %), **COV et HC** (9 %), **SO_2** (< 1 %)





(source : Ademe, juin 2014)

II.2 – Traitement des gaz d'échappement

Techniques de réduction des émissions polluantes

- **Réduction du CO_2** par un meilleur rendement énergétique et une limitation de la consommation :

  → fonctionnement en mélange pauvre pour le moteur Essence

  → optimisation de la combustion pour les deux types de moteur (CAI ou HCCI)

- **Post-traitement des HC et CO** par oxydation en H_2O et CO_2

  → fonctionnement en mélange pauvre et catalyse d'oxydation (Diesel)

  → fonctionnement à richesse 1 et catalyse trois-voies (Essence)

- **Post-traitement des NOx** par réduction en N_2

  → fonctionnement à richesse 1 et catalyse trois-voies (Essence)

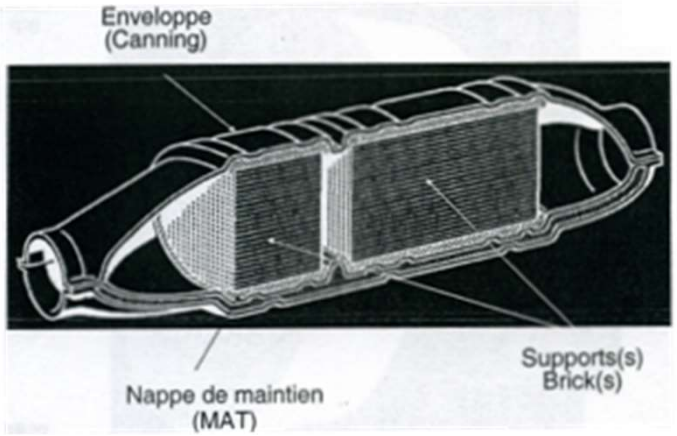
  → fonctionnement en mélange pauvre et piège à NOx ou catalyse de réduction à l'urée

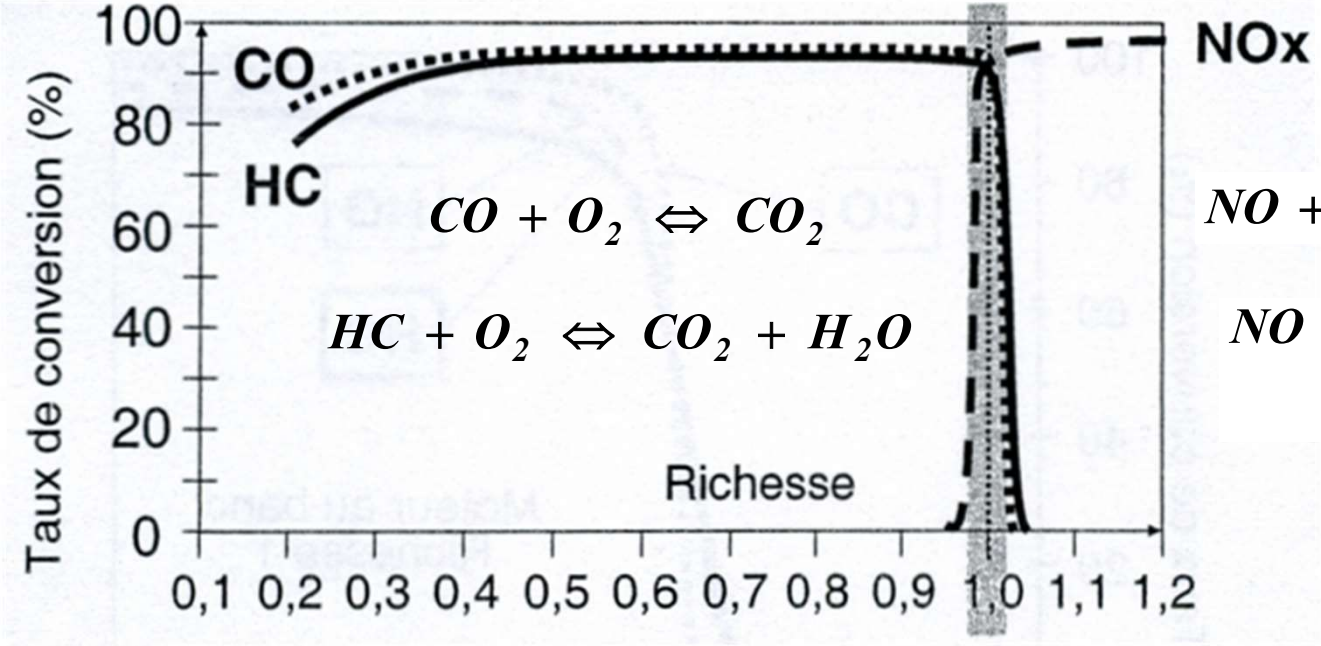
- **Élimination des particules** par captation (FAP sur Diesel)

II.2 – Traitement des gaz d'échappement

Techniques de « post-traitement »

Les techniques de dépollution en post-traitement sont choisies en fonction de la nature des effluents, des concentrations (richesse), du débit et des conditions de température.





$$CO + O_2 \Leftrightarrow CO_2$$

$$HC + O_2 \Leftrightarrow CO_2 + H_2O$$

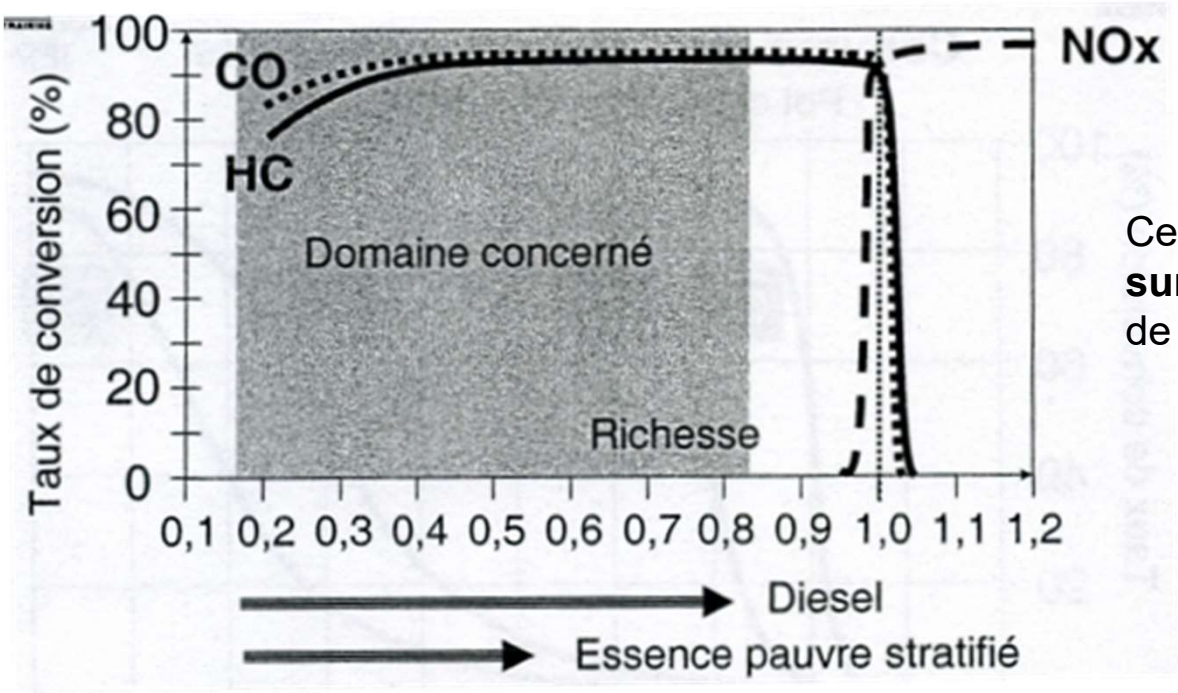
$$NO + CO \Leftrightarrow N_2 + CO_2$$

$$NO + HC \Leftrightarrow N_2 + CO_2 + H_2O$$

II.2 – Traitement des gaz d'échappement

Oxydation des HC et du CO

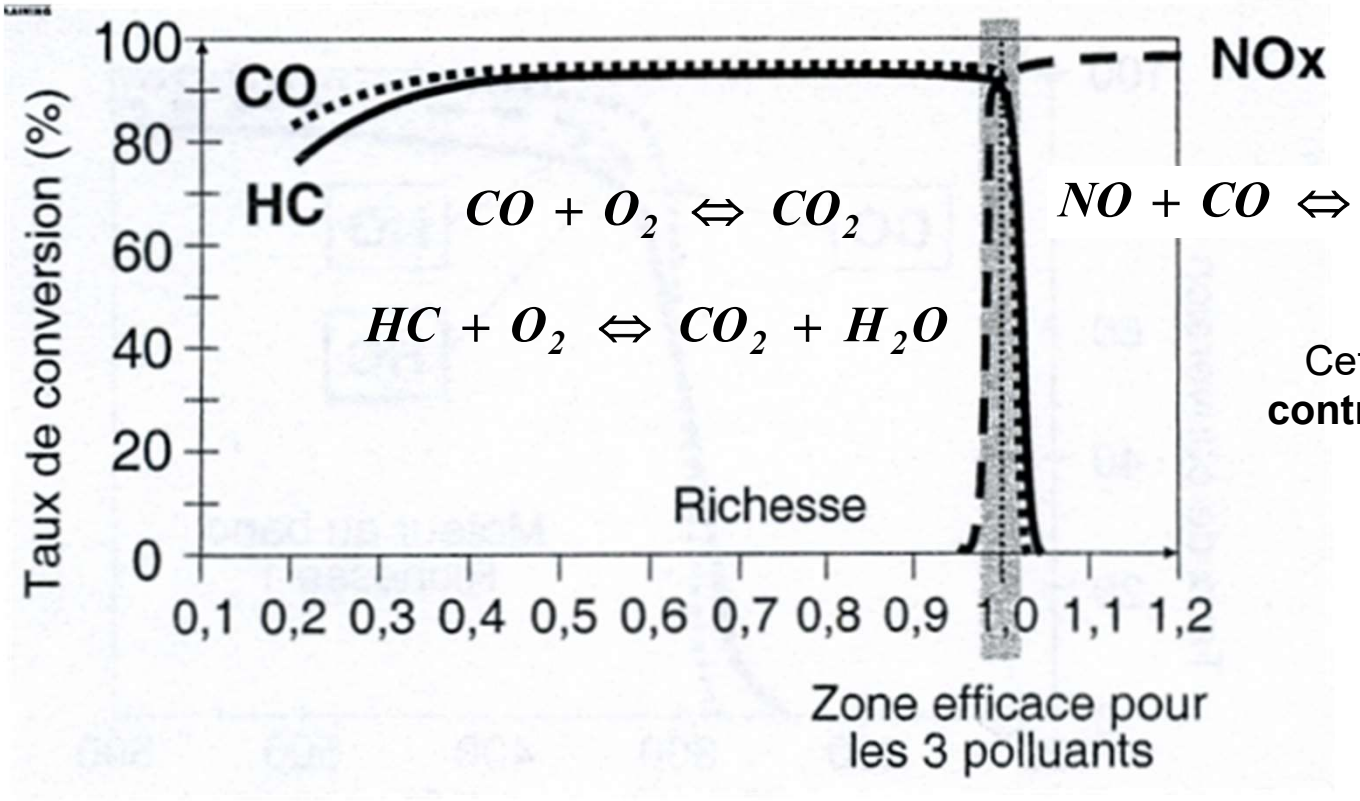
- Utilisation d'un **catalyseur d'oxydation spécifique (Pt, Pd)** efficace en présence d'excès d'O_2



Cette catalyse n'a **pas d'action sur les NOx** (seule oxydation de NO en NO_2)

La catalyse d'oxydation (catalyse deux-voies) est utilisée pour **moteur Diesel** ou **Essence en mélange pauvre**.

▪ **Catalyse tri-fonctionnelle (TWC) efficace** pour un moteur Essence classique mais pas pour un moteur Diesel ni un Essence en mélange pauvre.



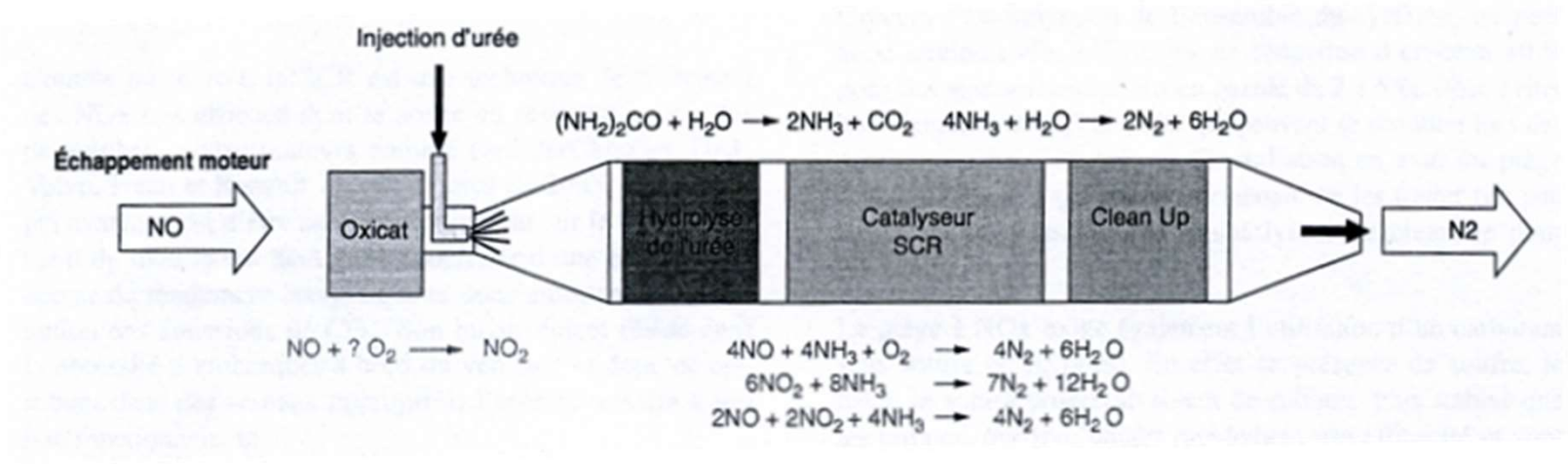
Cette catalyse nécessite un **contrôle précis de la richesse**

Les **oxydes de terres rares** CeO_2 et ZrO_2 (20% en masse) stabilisés sur support d'alumine permettent le **stockage de l'oxygène nécessaire à l'oxydation des HC** en mélange riche. Catalyseurs métalliques (Pt, Pd et Rh à 0.01-0.04 %).

Réduction des NOx

▪ La question est de savoir **comment réduire les NOx** des moteurs Diesel et Essence en mélange pauvre, où l'oxygène est en excès.

▪ Nécessité d'introduire des agents réducteurs comme l'urée ou les hydrocarbures. C'est la **réduction catalytique sélective (SCR).**

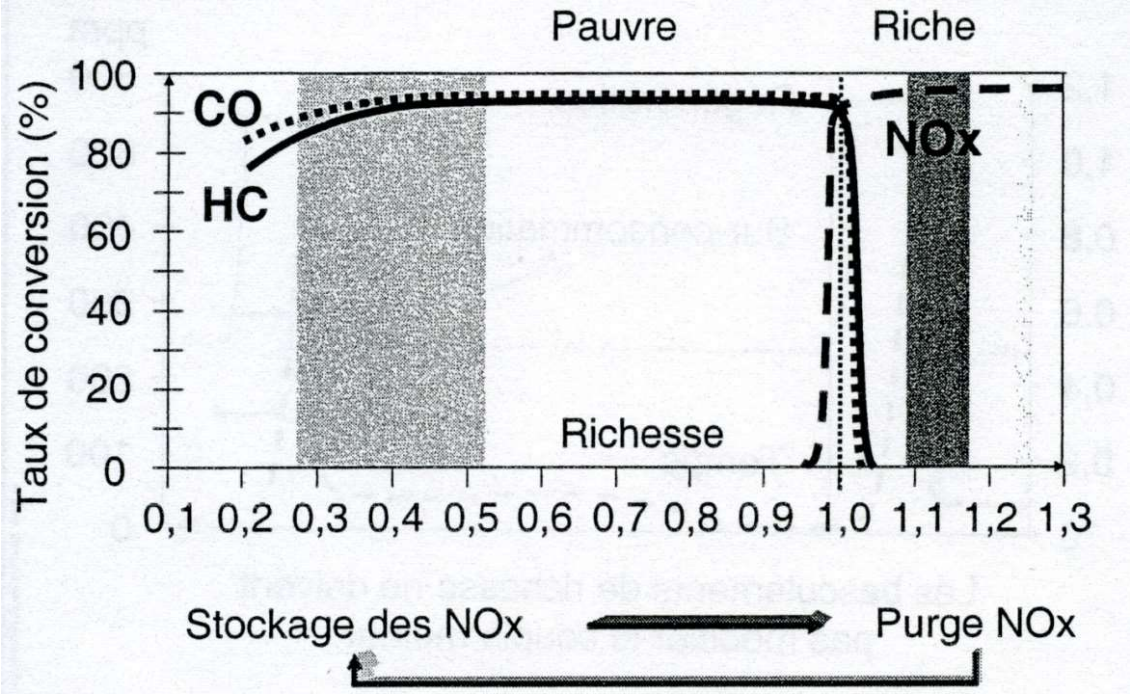


✓ SCR par NH_3 obtenu à partir de l'hydrolyse de l'urée et catalyse par V_2O_5 / TiO_2 entre 200 et 400 °C, avec 90 % d'efficacité.

✓ Un pré-catalyseur oxyde NO en NO_2 afin d'augmenter l'efficacité de conversion à basse température.

✓ Applicable aux véhicules lourds mais pas aux véhicules légers (raison de sécurité, de toxicité et de coût).

▪ Pièges à NOx



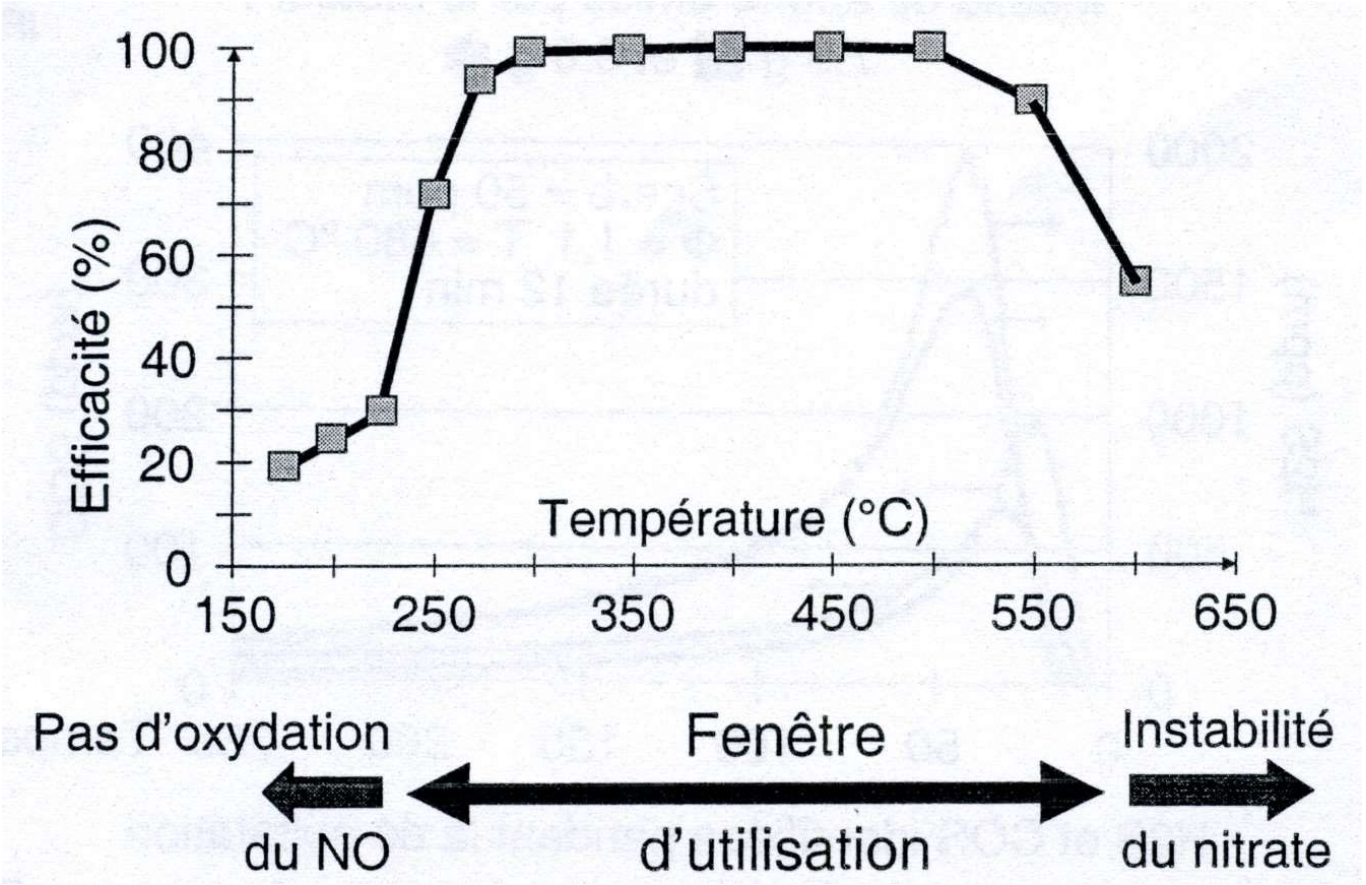
✓ **Oxydation de NO en NO_2 en mélange pauvre** et piégeage sous forme de nitrates (par oxyde de baryum)

✓ **Déstockage en mélange riche** avec réduction de NO_2 par CO et HC.

✓ Problème de **régénération** : augmentation de la température qui conduit à sortir de la fenêtre de piégeage.

✓ Problème de **désulfatation** (sulfate BaSO4 plus stable que les nitrates $Ba(NO_3)_2$). Les carburants doivent comporter très peu de soufre < 10 ppm.

- **Efficacité** du piège à NOx



III – Traitement de l'eau

Le traitement des eaux usées (ou traitement de l'eau) est le processus d'élimination des contaminants d'une eau d'origine urbaine ou industrielle, que ce contaminant soit organique ou inorganique, soluble ou non.

On distingue :

- **Eaux résiduaires urbaines (ERU)** (DCO < 1g/l)

- **Eaux résiduaires industrielles (ERI)** (DCO > 1g/l)

Dans la plupart des pays et en particulier dans les milieux urbanisés, les eaux usées sont soit collectées par un réseau collectif d'assainissement (ou anciennement « tout à l'égout ») puis acheminées jusqu'à une station de traitement, soit elles sont gérées de manière autonome ou directement sur un site industriel (assainissement non collectif).

III – Traitement de l'eau

Les principaux textes de loi, programmes, plans d'action sont :

- ✓ **Niveau européen**
  - Directive cadre sur l'eau (2000/60/CE) et directive « Nitrates » (91/676/CEE)
  - Directive 91/271/CEE (DERU) sur le traitement des eaux résiduaires urbaines
  - Directive 86/278/CEE relative à l'utilisation des boues d'épuration
- ✓ **Droit national**
  - Lois du 03/01/92 et du 31/12/2006 sur l'eau et les milieux aquatiques
  - Différents arrêtés (02/02/98, 22/06/2007, 2012…)
- ✓ **Programmes et plans nationaux**
  - Plan d'actions 2007-2011 puis 2012-2018 pour la mise aux normes de l'assainissement collectif des eaux usées
  - Plan national « assainissement non collectif » 2009-2013
  - Plans de prévention sur les micropolluants (Ecophyto 2, Résidus 2011, Micropolluants 2010-2013 puis 2016-2021)
- ✓ **Actions « régionales »**
  - Schémas directeurs de gestion et d'aménagement des eaux (SDAGE)

III – Traitement de l'eau

Différents procédés de traitement selon :

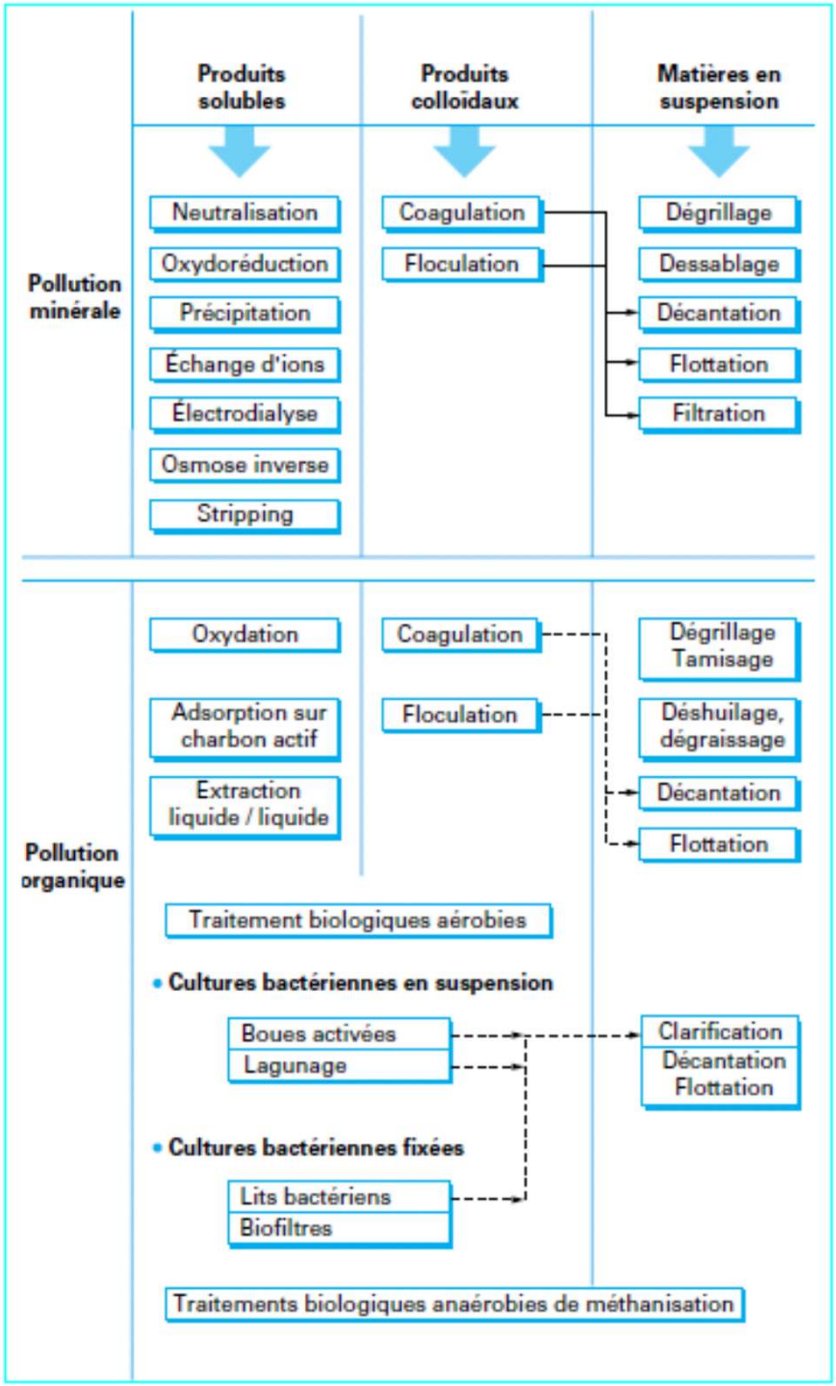
- **Origine** (urbaine, industrielle,…)
- **Nature** (minérale, organique)
- **Forme** (soluble, insoluble)

Tableau 1 – Caractéristiques générales et valeurs limites fixées en concentration (cas des ERI)

Critères de pollution	Flux de pollution (kg/j)	Valeur limite (moyenne sur 24 h) (mg/L)
Matières en suspension totale (MEST)	⩽ 15	100
	> 15	35
Demande biochimique en oxygène (DBO_5)	⩽ 30	100
	> 30	30
Demande chimique en oxygène (DCO)	⩽ 100	300
	> 100	125

Caractéristiques générales des rejets :
— pH ..... 5,5 à 8,5 (cas général),
5,5 à 9,5 (neutralisation alcaline à la chaux) ;
— Température 30 °C ;
— Couleur < 100 mg platine-cobalt/L.

Source : Techniques de l'Ingénieur g1250, 1999



III.1 – Assainissement des eaux résiduaires urbaines

On distingue les eaux pluviales des eaux domestiques :

- **Eaux pluviales** :

Eaux de ruissellement des surfaces imperméables (lavages voieries, pluies, drainages).
Le code de l'environnement soumet à autorisation ou à déclaration les rejets d'eaux pluviales dans le cas de forts débits ou lorsqu'ils sont chargés de polluants.
Réseau unitaire ou séparatif.

- **Eaux domestiques** :

Elles sont constituées des eaux grises et des eaux vannes.
Les eaux usées domestiques sont souvent traitées dans les stations d'épuration (STEP) par les agglomérations urbaines d'assainissement conformément aux règlementations définies dans l'arrêté du 22 juin 2007.

Quantification globale de la pollution des eaux domestiques en « **Equivalent Habitant** » (1 EH = DBO5 de 60g/j)

Pour que les eaux puissent être traitées en STEP, il faut : $\begin{cases} DCO/DBO5 < 3 \\ C/N/P \approx 100/5/1 \end{cases}$

III.2 – Stations d'épuration

Il existe en France plus de **15000 stations d'épuration** de traitement des eaux usées urbaines (> 16 millions de m^3 d'eau traitée par jour) et utilisent plusieurs techniques de traitement suivant la zone géographique et les eaux arrivant dans les stations.

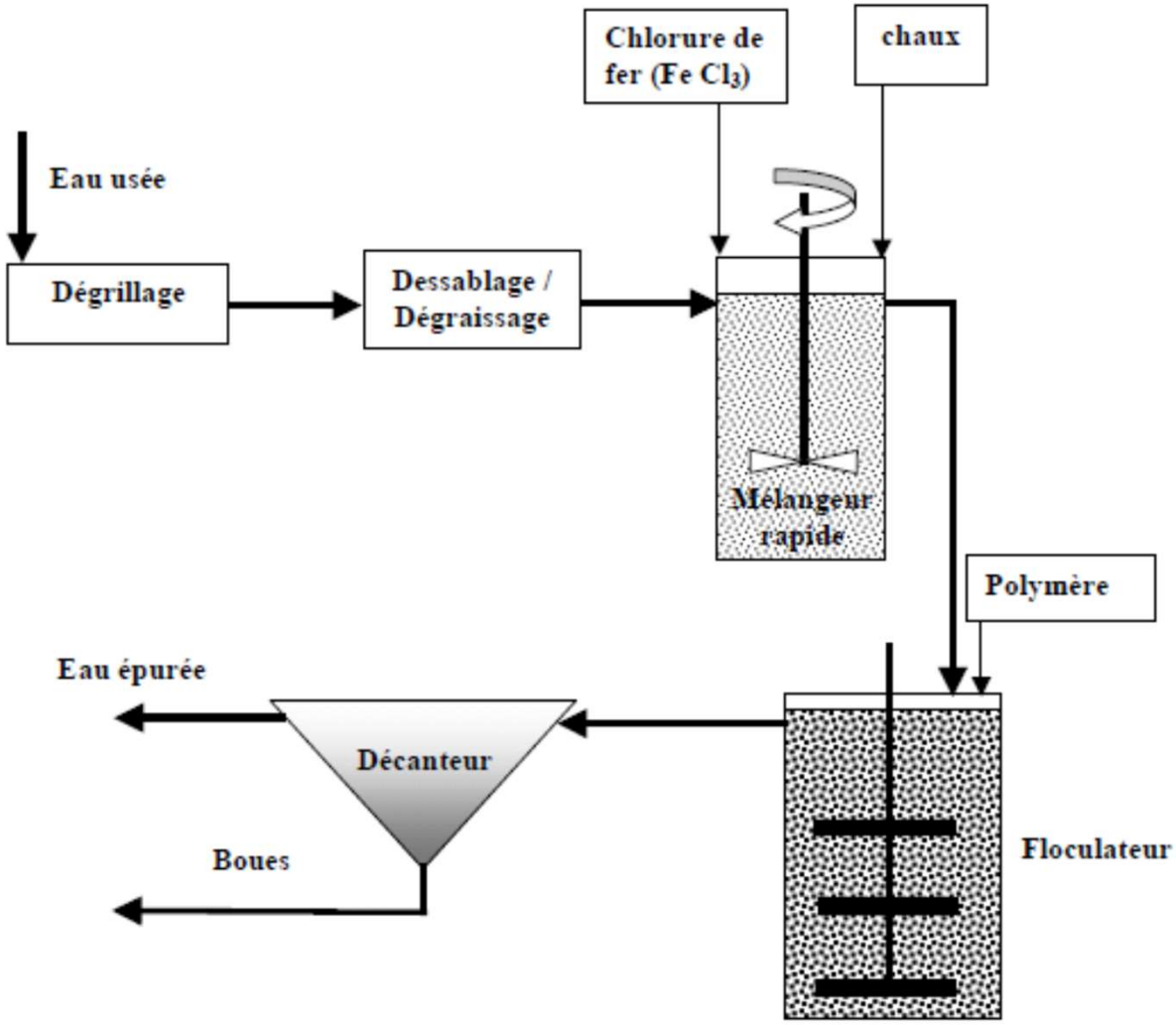
> Dans le cas du raccordement d'un établissement industriel, celui-ci doit être autorisé par la collectivité ou l'organisme qui gère la station. La station d'épuration entre alors dans le champ de la nomenclature des installations classées.

Les étapes successives au traitement de l'eau dans une STEP sont les suivantes :

- **Pré-traitement mécanique** : éliminer les éléments solides en suspension ou flottation

III.2 – Stations d'épuration

• **Traitement primaire (facultatif)** : éliminer une grande partie de la matière en suspension (MEST)



Utilisation de procédés physiques ou chimiques pour déstabiliser la MEST :

Coagulation
Floculation
Décantation

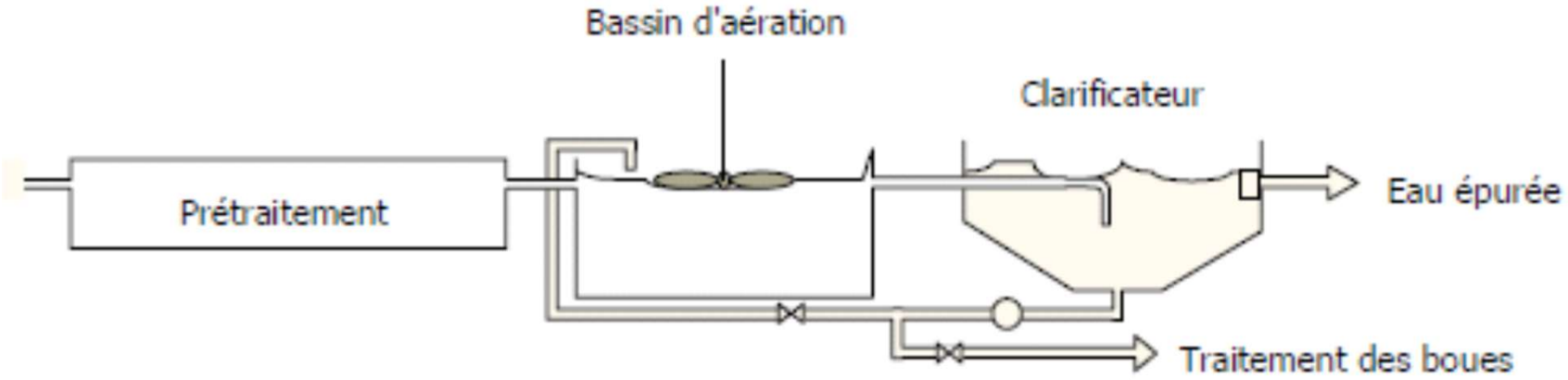
Elimination jusqu'à 90 % de la MEST et 40 à 65 % de la DBO5.

• **Traitement secondaire par procédés biologiques** : éliminer une grande partie de la matière en suspension (MEST)

Utilisation de micro-organismes (bactéries,…) en culture libre ou fixée
pour transformer la matière organique (et éventuellement la matière minérale)

Stratégie « **aérobie** » :

Eaux usées + biomasse + O_2 ⟹ **Eaux épurées + Boues (++) + CO_2 + H_2O**



Principe des boues activées (micro-organismes en culture libre)
0,2 à 0,6 kg de boues (matière sèche) pour 1 kg de DCO éliminée
Système le plus largement utilisé mais nécessite une ligne de traitement des boues

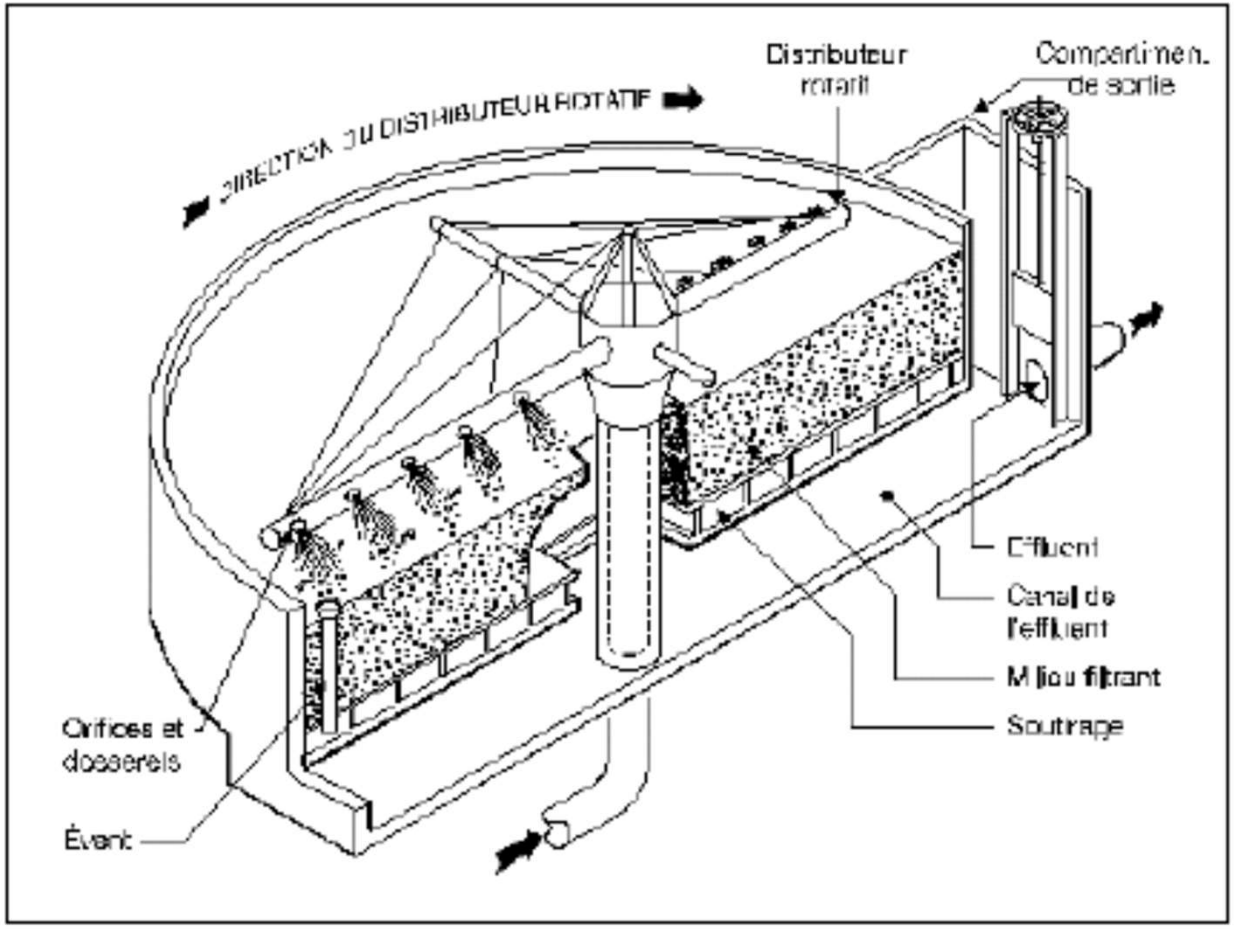
Stratégie « **anaérobie** » :

Eaux usées + biomasse ⟹ Eaux épurées + Boues (--) + CO_2 + CH_4 + H_2O

Principe du lit bactérien (micro-organismes en culture fixée)
760 litres de biogaz théoriques pour 1 kg de DCO éliminée

Système utilisé lorsque la DCO est suffisante (STEP traitant des eaux résiduaires industrielles)

Valorisation du biogaz dans certaines industries

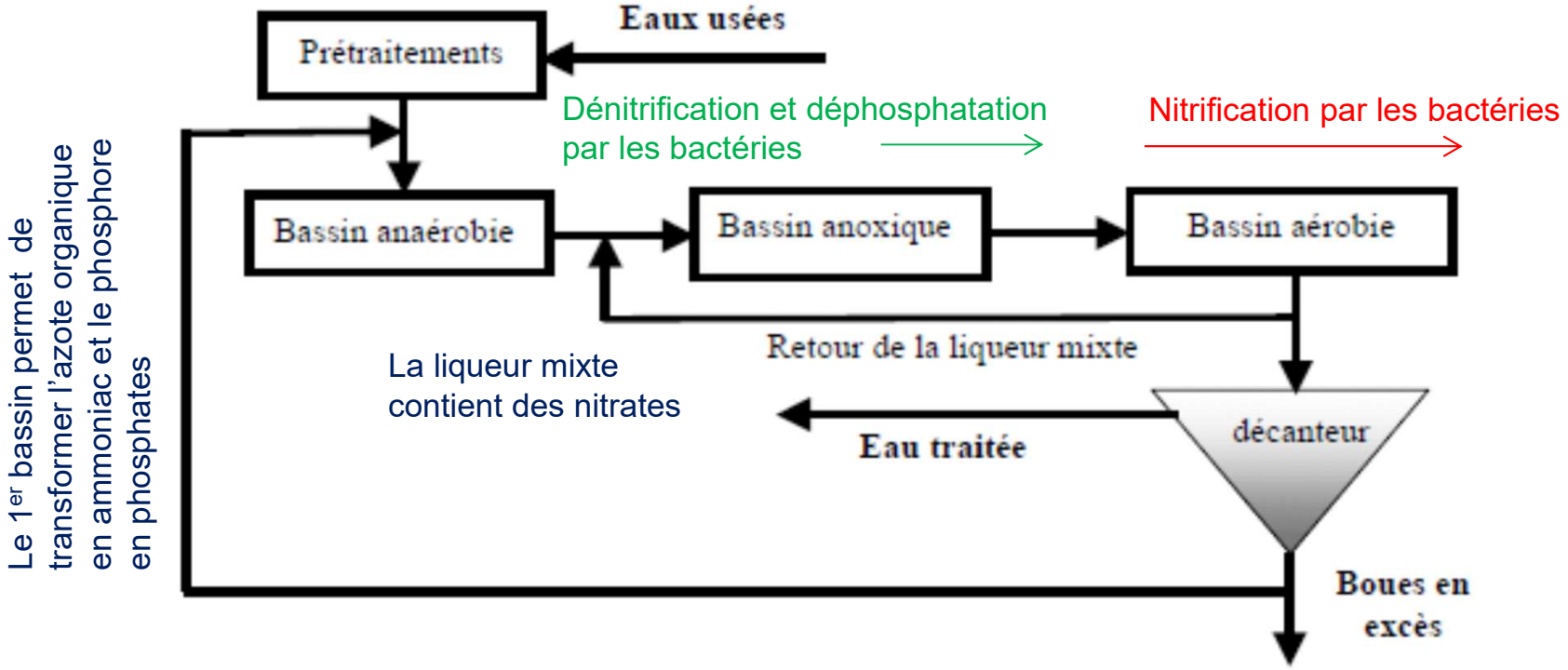


III.2 – Stations d'épuration

• **Procédés de boues activées à alternance de phase** : dénitrifier et déphosphater sur des STEP de grandes capacités

En présence d'oxygène (aérobie), l'ammoniac est transformé en nitrates.
En l'absence d'oxygène (anoxie), les nitrates sont transformés en azote gazeux.

L'alternance de phase aérobie et anoxie permet une concentration des phosphates dans les micro-organismes et leur élimination progressive dans l'eau.



Une **station d'épuration** doit être dimensionnée de sorte à pouvoir recevoir les effluents du bassin habité pour une période d'au moins 25 – 30 ans.

Réalisation en lots fonctionnels successifs.

Conception selon les paramètres suivants :

- La charge hydraulique (quantité totale des eaux à traitées en m^3 / j).
- La charge organique : DCO, DBO5 (en g/l)
- La charge volumique : DCO (en kg / m^3 de réacteur / j)
- La charge en nutriments : NGI et PT (en g/l)
- Présence d'autres polluants (métaux lourds, produits toxiques, solvants,…)
- pH, oxygène dissout, conductivité, température

Les stations d'épuration aérobie ont des rendements supérieures à 90 % et traitent des charges volumiques comprises entre 0,7 et 4 kg/m^3/j (cinétique plus rapide qu'en anaérobiose).

Les avantage des stations anaérobie sont une moindre consommation d'énergie, une moindre production de boues (5 fois moins) et la production de biogaz (60 à 70 % de méthane).

III.3 – Assainissement des eaux résiduaires industrielles (ERI)

Les ERI ont des concentrations en polluants très variés selon l'industrie émettrice. Elles peuvent être raccordées au réseau d'assainissement collectif si elles sont prétraitées ou en tous cas compatibles avec les STEP.

On distingue trois grandes familles :

• Les **eaux de refroidissement et de lavage** que l'on peut traiter par adoucissement, osmose inverse, déminéralisation

• Les **effluents industriels (eaux de process)** traités par bio-réacteur à membranes, boues activées, méthanisation, traitement des huiles et des graisses, recyclage…

• Les **boues industrielles** traitées par épaississement, déshydratation, digestion, valorisation matière et énergétique.

Les techniques de traitement seront à adapter à chaque type d'industrie.

III.3 – Assainissement des eaux résiduaires industrielles (ERI)

Type de pollution	Traitement biologique	Traitement physico-chimique
Organique	Selon biodégradabilité	Oui
Azotée	Oui	Stripping par ammoniac
Phosphorée	Par alternance anaérobie / aérobie	Précipitation-décantation
Métallique	Non	Oxydation/précipitation/décantation Concentration par recyclages, résines échangeuses d'ions, techniques à menbrane, électrolyse Adsorption sur charbon actif
Pesticides, HAP, benzène et organochlorés	Non	Oxydation chimique puissante Adsorption sur charbon actif Nanofiltration, osmose inverse (coût élevé)
COV	Cultures fixées	Stripping Oxydation chimique Adsorption sur charbon actif
PCB	Non	Incinération spécifique à haute température Adsoprtion sur charbon actif
Arsenic	Non	Précipitation Adsorption Résines échangeuses d'ions Filtration sur membrane

III.4 – Traitement des boues issues de l'épuration

Les étapes de traitement des effluents industriels génèrent des sous-produits et déchets qui sont récupérés et forment les **boues industrielles**.

En France, 30% des déchets industriels sont sous la forme de boues, soit 2 millions de tonnes par an de boues produites (correspond à 50 à 70 g/l d'effluent traité).

On distingue trois types de boues en fonction de la matière sèche contenue :

- Les boues liquides : 5% à 10%
- Les boues pâteuses : 10% à 20%
- Les boues solides : + de 20%

Les principaux traitements des boues industrielles sont :

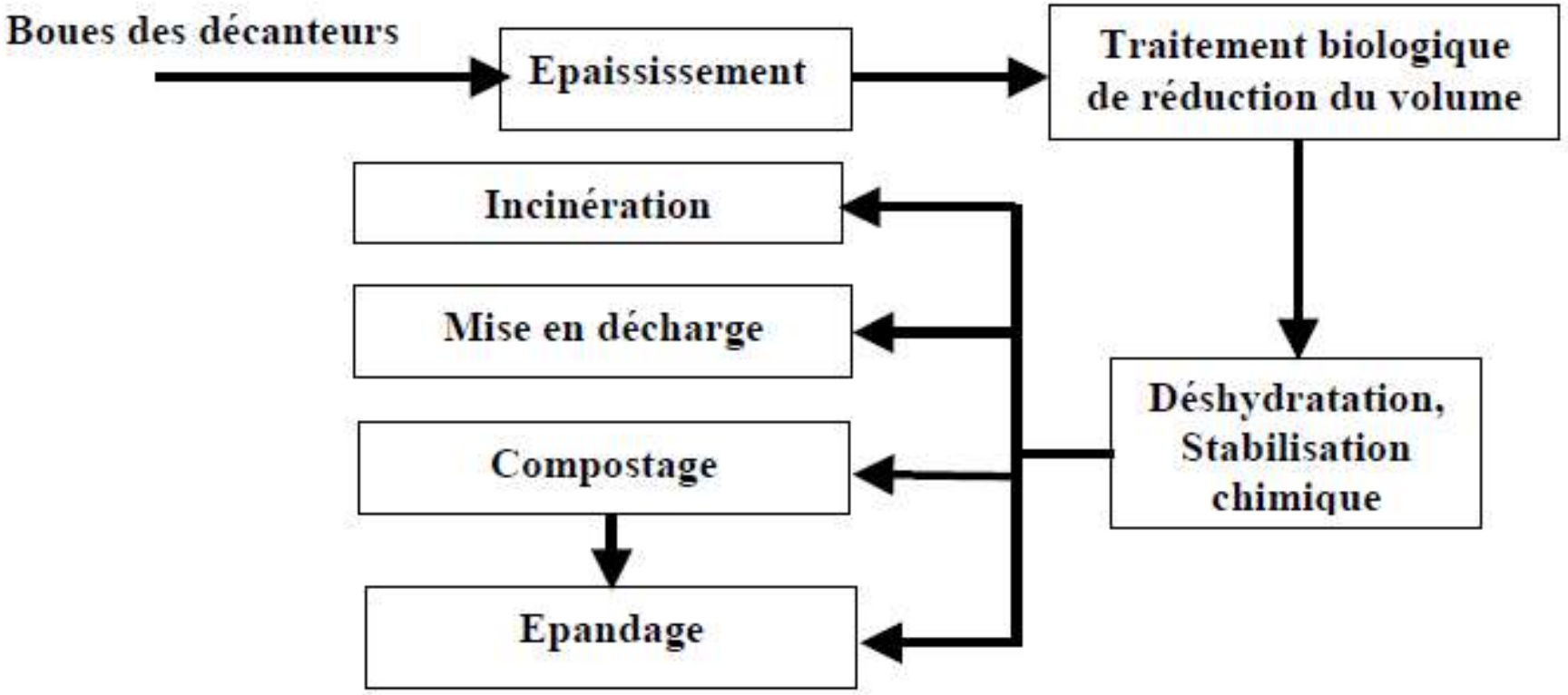
- Traitement en amont du processus (optimisation des procédés pour réduire les volumes)
- Traitement « a posteriori » selon nature chimique et physique :

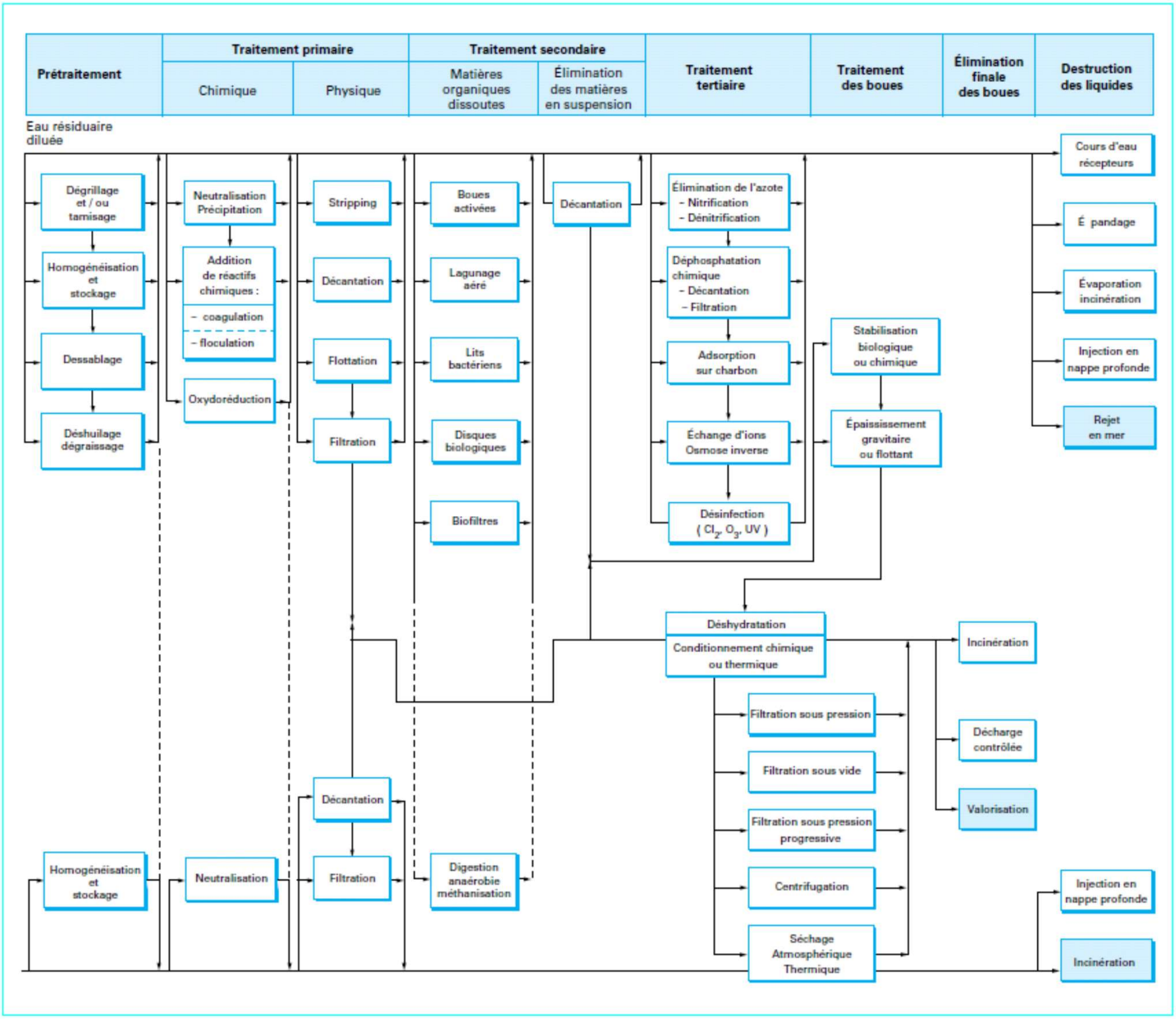
Épaississement, Digestion anaérobie, Traitement des odeurs, Oxydation par voie humide, Stabilisation thermique et chimique, Incinération, Compostage, Epandage, Mise en décharge

La valorisation des boues industrielles est un débouché important.

III.4 – Traitement des boues issues de l'épuration

Les différentes techniques de traitement des boues mettent en œuvre des procédés physico-chimiques ou microbiologiques. Il s'agit ici d'appliquer des techniques de traitement des déchets solides.




Prétraitement
Traitement primaire
Chimique
Physique
Traitement secondaire
Matières organiques dissoutes
Élimination des matières en suspension
Traitement tertiaire
Traitement des boues
Élimination finale des boues
Destruction des liquides
Eau résiduaire diluée
Dégrillage et / ou tamisage
Homogénéisation et stockage
Dessablage
Déshuilage dégraissage
Neutralisation Précipitation
Addition de réactifs chimiques :
– coagulation
– floculation
Oxydoréduction
Stripping
Décantation
Flottation
Filtration
Boues activées
Lagunage aéré
Lits bactériens
Disques biologiques
Biofiltres
Décantation
Élimination de l'azote
– Nitrification
– Dénitrification
Déphosphatation chimique
– Décantation
– Filtration
Adsorption sur charbon
Échange d'ions Osmose inverse
Désinfection (Cl2, O3, UV)
Stabilisation biologique ou chimique
Épaississement gravitaire ou flottant
Cours d'eau récepteurs
É pandage
Évaporation incinération
Injection en nappe profonde
Rejet en mer
Déshydratation
Conditionnement chimique ou thermique
Filtration sous pression
Filtration sous vide
Filtration sous pression progressive
Centrifugation
Séchage Atmosphérique Thermique
Incinération
Décharge contrôlée
Valorisation
Injection en nappe profonde
Incinération
Homogénéisation et stockage
Neutralisation
Décantation
Filtration
Digestion anaérobie méthanisation

I2 – Procédés et filières de traitement

Pré-traitement	***Traitement***	***Post-traitement***
Dilution Préchauffage	**Oxydation thermique**	Air : Fumée, Soufrés azotés, acidité…
Dilution Préchauffage Elimination des particules	**Oxydation catalytique**	Air : Fumée, Soufrés azotés, acidité…
Déshumidification	**Condensation**	Eau
Refroidissement Elimination des particules Oxydation pour NO	**Absorption**	Eau de lavage
Refroidissement pour COV Déshumidification Elimination des particules Désulfuration et réchauffement pour NO_x	**Adsorption**	Adsorbant usagé
Elimination de particules	**Plasma**	Sous-produits azotés, ozone
Refroidissement	**Photocatalyse**	Régénération catalyseur Sulfates, nitrates
Humidification Refroidissement Elimination de particules	**Biofiltration**	Garnissage Eau d'humidification Aérosol