

Typologie des enjeux environnementaux et usage des différentes méthodes d'évaluation environnementale



**TYPOLOGIE DES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX
ET USAGE DES DIFFERENTES METHODES
D'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE,
NOTAMMENT DANS LE DOMAINE DES DECHETS ET
DES INSTALLATIONS INDUSTRIELLES**

RAPPORT FINAL

juin 2005

B. DE CAEVEL, M. OOMS - RDC-ENVIRONNEMENT - Bruxelles

Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et organismes publics) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :
RECORD, RECORD, Typologie des enjeux environnementaux et usage des différentes méthodes d'évaluation environnementale, notamment dans le domaine des déchets et des installations industrielles, 2005, 99 p, n°03-1011/1A.
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr

© RECORD, 2005

Table des matières

I. INTRODUCTION	1
I.1. CONTEXTE	1
I.2. MÉTHODOLOGIE.....	4
I.3. PERCEPTION DES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX	7
II. TYPOLOGIE DES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX	10
II.1. CHANGEMENT CLIMATIQUE	10
II.1.1. <i>Augmentation de l'effet de serre</i>	10
A Causes principales.....	10
B Principaux polluants.....	11
C Effets potentiels.....	12
D Liens vers d'autres enjeux environnementaux	13
II.1.2. <i>Destruction de la couche d'ozone stratosphérique</i>	13
A Causes principales.....	13
B Principaux polluants.....	14
C Effets potentiels.....	15
D Interaction avec d'autres types de pollution	15
II.1.3. <i>Augmentation de la teneur en aérosols</i>	15
A Synthèse	16
II.2. EFFETS SUR LA NATURE ET LA BIODIVERSITÉ	19
II.2.1. <i>Vecteur de transmission – EAU</i>	19
A Causes principales.....	19
B Types de pollution et effets potentiels	20
C Interaction avec d'autres types de pollution	25
II.2.2. <i>Vecteur de transmission – AIR</i>	25
II.2.3. <i>Vecteur de transmission – SOL</i>	26
A Types de pollution et effets potentiels	26
B Interactions avec d'autres types de pollution	28
II.2.4. <i>Synthèse</i>	28
II.3. EFFETS SUR LA SANTÉ HUMAINE	34
II.3.1. <i>Toxicité humaine par polluants</i>	34

II.3.2.	<i>Smog</i>	37
A	Causes principales.....	37
B	Principaux polluants et effets.....	38
C	Interaction avec d'autres types de pollution.....	38
II.3.3.	<i>Destruction de la couche d'ozone stratosphérique</i>	39
A	Causes principales.....	39
B	Interaction avec d'autres types de pollution.....	39
II.3.4.	<i>Nuisances sensorielles</i>	39
II.3.5.	<i>Effets craints – nuisances non sensorielles</i>	40
A	OGM.....	40
B	Ligne à haute tension.....	40
C	Les ondes électromagnétiques (téléphone cellulaire).....	41
II.3.6.	<i>Synthèse</i>	42
II.4.	UTILISATION DE RESSOURCES NATURELLES.....	44
II.4.1.	<i>Utilisation excessive de ressources naturelles renouvelables</i>	44
II.4.2.	<i>Utilisation des ressources naturelles non renouvelables</i>	45
II.4.3.	<i>Synthèse</i>	45
III.	MÉTHODES D'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE.....	47
III.1.	ANALYSE DU CYCLE DE VIE.....	47
III.1.1.	<i>Synthèse de la méthodologie</i>	47
A	Description des étapes de l'analyse de cycle de vie.....	48
B	Enjeux environnementaux pris en compte.....	54
III.1.2.	<i>Principaux domaines d'application</i>	56
III.1.3.	<i>Limites de la méthode</i>	57
III.1.4.	<i>Pour en savoir plus</i>	59
III.2.	L'ÉVALUATION DU RISQUE SANITAIRE.....	60
III.2.1.	<i>Synthèse de la méthodologie</i>	60
A	Description de la méthode.....	60
B	Enjeux environnementaux pris en compte.....	62
III.2.2.	<i>Principaux domaines d'application</i>	63
III.2.3.	<i>limites de la methode</i>	63
III.2.4.	<i>Pour en savoir plus</i>	64
III.3.	EVALUATION DES RISQUES POUR LES ÉCOSYSTÈMES.....	66

<i>III.3.1. Synthèse de la méthodologie</i>	66
A Description de la méthode.....	66
B Enjeux environnementaux pris en compte	68
<i>III.3.2. Principaux domaines d'application</i>	68
<i>III.3.3. Limites de la méthode</i>	69
III.4. LES INDICATEURS	70
<i>III.4.1. Synthèse de la méthodologie</i>	70
A Description de la méthode.....	70
B Enjeux environnementaux pris en compte	71
<i>III.4.2. Principaux domaines d'application</i>	72
<i>III.4.3. limites de la methode</i>	72
<i>III.4.4. Exemples de groupes d'indicateurs</i>	73
<i>III.4.5. Pour en savoir plus</i>	74
III.5. EXEMPLE D'INDICATEUR : L'EMPREINTE ÉCOLOGIQUE	75
<i>III.5.1. Synthèse de la méthodologie</i>	75
A Description de la méthode.....	75
B Enjeux environnementaux pris en compte	76
<i>III.5.2. Principaux domaines d'application</i>	77
<i>III.5.3. limites de la méthode</i>	77
<i>III.5.4. Pour en savoir plus</i>	77
IV. CONCLUSIONS	78
V. BIBLIOGRAPHIE	84
VI. ANNEXES	86

RESUME

La notion de "préservation de l'environnement" est généralement perçue comme un tout alors que les enjeux qui lui sont associés sont extrêmement variables et hétérogènes : respect de la biodiversité, effet de serre, déforestation, qualité de l'eau, qualité de l'air, destruction de la couche d'ozone etc. Aujourd'hui, le besoin d'une approche globale claire et compréhensible de ces enjeux est fortement ressenti, tant au niveau des acteurs « environnementaux » (réalisateurs d'études confrontés aux limites de leur compétence, communicants, etc.) que « non environnementaux » (client ou citoyen à la recherche d'information).

Une fois les enjeux environnementaux correctement identifiés et définis, il s'agit d'évaluer correctement la contribution de l'activité humaine sur chacun d'eux. Pour ce faire, l'évaluateur dispose de différentes méthodes qui diffèrent de par les (types d')enjeux environnementaux pris en compte, l'état des connaissances scientifiques et leur difficulté de mise en œuvre.

Face à ces difficultés, l'objectif de cette étude est de :

- ✓ clarifier les enjeux environnementaux en les structurant et en les détaillant
- ✓ définir la correspondance entre les enjeux identifiés et les méthodes d'évaluation environnementale.

Mots clés :

Enjeux environnementaux, typologie des enjeux environnementaux, méthodes d'évaluation environnementale, Analyse du Cycle de Vie, Empreinte écologique, Indicateurs, Evaluation du risque sanitaire, Evaluation des risques pour les écosystèmes, cartes de perception des enjeux environnementaux.

SUMMARY

The notion of "environment conservation" is generally perceived as a whole, even though the stakes associated with it are extremely variable and heterogeneous : respect of biodiversity, greenhouse effect, deforestation, water quality, air quality, destruction of the ozone layer etc. Today, the need for a clear and comprehensible global approach of these stakes is making itself felt, as much on the level of "environmental" actors (authors of studies confronted with the limits of their working domain, communicators, etc.) as "non environmental" actors (client or citizen looking for information).

Once the environmental stakes have been correctly identified and defined, it is necessary to correctly assess the contribution of human activity to each of them. In order to do this, the assessor can use various methods, which differ in terms of (types of) environmental stakes taken into account, the state of scientific knowledge, the difficulty of implementing them.

Given these difficulties, the objectives of this study are to :

- ✓ clarify the environmental stakes by structuring and itemizing them
- ✓ define the correspondence between the stakes identified and methods of environmental assessment.

Key words:

environmental stakes, Typology of environmental stakes, methods of environmental assessment, Life Cycle Assessment, Ecological footprint, indicators, Health Risk Assessment, Ecosystem Risk Assessment, perception maps of environmental stakes

Liste des tableaux

Tableau 1	Caractéristiques des enjeux environnementaux associés au thème : "changement climatique".....	17
Tableau 2	Caractéristiques des enjeux environnementaux associés au thème : "Nature & Biodiversité - Eau"	29
Tableau 3	Caractéristiques des enjeux environnementaux associés au thème : "Nature & Biodiversité - Air"	30
Tableau 4	Caractéristiques des enjeux environnementaux associés au thème : "Nature & Biodiversité - Sol"	30
Tableau 5	Caractéristiques des enjeux environnementaux associés au thème : "Effets sur la santé humaine"	42
Tableau 6	Caractéristiques des enjeux environnementaux associés au thème : "Utilisation des ressources naturelles"	45
Tableau 7	Méthodes de pondération utilisées dans la réalisation d'une ACV.....	51
Tableau 8	Catégories d'impact prises en compte dans une ACV	55
Tableau 9	Présentation enjeux environnementaux pris en compte par chaque méthode et leurs principaux avantages et limites.....	81

Liste des figures

Figure 1	Présentation générique des chaînes d'effets	2
Figure 2	Facteurs de forçage à l'origine des changements climatiques.....	16
Figure 3	Carte de perception des enjeux environnementaux associés au thème : "Changement climatique"	18
Figure 4	Carte de perception des enjeux environnementaux associés au thème " Nature & Biodiversité - EAU"	31
Figure 5	Carte de perception des enjeux environnementaux associés au thème " Nature & Biodiversité - AIR"	32
Figure 6	Carte de perception des enjeux environnementaux associés au thème " Nature & Biodiversité - SOL"	33
Figure 7	Carte de perception des enjeux environnementaux associés au thème : "Effets sur la santé humaine"	43
Figure 8	Carte de perception des enjeux environnementaux associés au thème : "Utilisation des ressources naturelles"..	46
Figure 9	Carte de perception des enjeux environnementaux + méthode d'évaluation environnementale.....	83

Abréviations

CE :	Commission Européenne
ERS :	Évaluation des risques sanitaires
OCDE :	Organisation de Coopération et de Développement Économiques
PNUD :	Programme des Nations Unies pour le Développement
US-EPA :	Environment Protection Agency des USA (Agence de protection de l'environnement)
VTR :	Valeur Toxicologique de Référence
WWF :	Organisation mondiale de protection de la nature (World Wildlife Fund)

Glossaire

Aérosols : Particules en suspension dans l'air constituées de substances solides et/ou liquides présentant une vitesse de chute négligeable. Minérales ou organiques, composées de matière vivante (pollens...) ou non, grosses ou fines, les particules en suspension constituent un ensemble extrêmement hétérogène de polluants dont la taille varie de l'ordre du dixièmes de nanomètres à une centaine de micromètres

Bio-accumulation : Rétention par des matériaux vivants de composés divers qui s'accumulent jusqu'à une certaine quantité sans détruire l'hôte d'accueil. Les lichens sont parmi les meilleurs bioaccumulateurs (métaux lourds, éléments-traces, phytosanitaires, dioxines). On utilise aussi le terme de Biocumulatif

Eutrophisation : Apport en excès de substances nutritives (nitrates et phosphates) dans un milieu aquatique pouvant entraîner la prolifération des végétaux aquatiques (fleur d'eau). Pour les décomposer, les bactéries aérobies augmentent leur consommation en oxygène qui vient à manquer et les bactéries anaérobies se développent en dégageant des substances toxiques : méthane, ammoniac, hydrogène sulfuré, toxines, etc. Toutes les mers, sauf les mers subarctiques, sont touchées par l'eutrophisation. Les teneurs en nitrate ont doublé, voire triplé dans la mer Noire et la mer d'Azov.

Flux élémentaire : Matière ou énergie sortant du système étudié, et rejetée dans l'environnement sans transformation humaine ultérieure (définition ISO 14040).

Forçage radiatif (ou effet radiatif) : Le forçage radiatif est la variation de l'éclairement énergétique vertical net [exprimé en watts par mètre carré (W/m²)] à la tropopause par suite d'un changement interne ou d'une modification du forçage externe du système climatique (exemple une modification de la concentration de dioxyde de carbone ou de la production solaire).

Immission : Concentration des particules dans l'air ambiant, transfert de polluants de l'atmosphère vers un récepteur. En traitement de l'air : désigne la pollution atmosphérique à l'endroit où elle déploie ses effets sur les humains, les animaux, les plantes, le sol et les biens matériels. Les immissions sont mesurées par prise d'échantillon dans l'air.

Pesticide : Substance chimique de synthèse principalement utilisée par l'agriculture pour détruire les êtres nuisibles pour les cultures : champignons, insectes, bactéries, herbes, ... Environ 350 produits différents (herbicide, insecticide, fongicide, nématicide, ...) sont connus pour être utilisés dans la Communauté Européenne aujourd'hui. Mal utilisés (en terme de quantités) et en raison de leur faible pouvoir de dégradation, les pesticides peuvent s'accumuler dans la chaîne alimentaire et/ou contaminer les milieux naturels, c'est la bio-accumulation. Les pesticides organiques sont en général classés en trois grands groupes : Organochloré, Organophosphoré et Carbamate et il y a de multiples familles..

Polluant organique persistant (POPs) : Concerne des produits chimiques industriels (BPC), des pesticides (DDT), le chlordane et le toxaphène, ainsi que des contaminants comme les dioxines et les furanes. Les principaux sont : les dioxines, furanes, PCB, et 9 substances actives de produits pesticides : aldrine, chlordane, DDT, dieldrine, endrine, heptachlore, hexachlorobenzène, mirex, et toxaphène. Les POPs s'accumulent dans les organismes vivants, persistent dans l'environnement et produisent des effets toxiques à long terme : dégradation du système immunitaire, effets sur la reproduction et sur le développement et propriétés cancérogènes. Leur présence dans l'environnement est due à l'activité humaine.

Les 4 propriétés qui les caractérisent sont :

- Toxicité : présentent un ou plusieurs impacts prouvés sur la santé humaine.
- Persistance dans l'environnement : molécules résistantes aux dégradations biologiques naturelles qui se dégradent de 50 % sur une durée de 7 à 8 ans.
- Bioaccumulation : molécules qui s'accumulent dans les tissus vivants et dont les concentrations augmentent le long de la chaîne alimentaire.
- Transport longue distance : de par leurs propriétés de persistance et de bioaccumulation, ces molécules ont tendance à se déplacer sur de longues distances et à se déposer loin des lieux d'émission, typiquement des milieux chauds (à forte activité humaine) vers les milieux froids (en particulier l'Arctique).

Rayons ultraviolets : Radiation électromagnétique dont la longueur d'onde s'étend de 15 nm à 400 nm. Il existe différents types de rayons UV regroupés en trois grandes classes: les rayons UV-C, les rayons UV-B et les rayons UV-A. L'impact des UV sur les organismes vivants dépend de la longue longueur d'onde de ces rayons : plus cette longueur d'onde est courte, plus le danger est grand. Les rayons UV-C sont ainsi les plus dangereux de la gamme.

Smog d'été : Désigne une formation d'ozone près du sol par l'influence de substances organiques, de l'oxyde azoté et du rayonnement solaire (quantifiés en kg équivalent C₂H₄).

Smog photochimique : Le terme "smog" a fait son apparition il y a plus de trois décennies pour décrire le mélange de fumée et de brouillard que l'on retrouve dans l'air. De nos jours, "smog" réfère à un mélange toxique de polluants atmosphériques que l'on peut souvent observer sous forme de brume diffuse dans l'air. Le smog peut rendre la respiration difficile (même chez les personnes en bonne santé) et il favorise les maladies cardio-respiratoires. Les personnes qui sont particulièrement vulnérables au smog sont les personnes présentant des troubles cardiaques et pulmonaires, les personnes âgées et les jeunes enfants. Les deux ingrédients principaux qui font que le smog affecte notre santé sont l'ozone des basses couches de l'atmosphère et les particules fines en suspension dans l'air.

Stratosphère : Couche qui va de la troposphère jusqu'à 50 km et où se situe la couche d'ozone.

Troposphère : Couche de l'atmosphère qui va du sol jusqu'à 8 à 16 km d'altitude.

I. INTRODUCTION

I.1. CONTEXTE

La notion de "préservation de l'environnement" est généralement perçue comme un tout alors que les enjeux qui lui sont associés sont extrêmement variables et hétérogènes : respect de la biodiversité, effet de serre, déforestation, qualité de l'eau, qualité de l'air, destruction de la couche d'ozone, santé humaine, bruit etc. Aujourd'hui, le besoin d'une approche globale claire et compréhensible de ces enjeux est fortement ressenti, tant au niveau des acteurs « environnementaux » (réalisateurs d'études confrontés aux limites de leur compétence, communicants, etc.) que « non environnementaux » (clients ou citoyens à la recherche d'information).

Une première étude, réalisée en 2000 pour RE.CO.R.D : "*Traitement multicritère des résultats d'ACV - Adaptation de la méthode Scan'Actor*" a mis en évidence la notion de "chaîne d'effets" pour les principales catégories d'impacts de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV). Ces chaînes d'effets, montrent clairement que ce qui est perçu par le grand public comme un "enjeu environnemental" relève en réalité de plusieurs impacts et qu'il peut lui même entraîner différents effets pour l'homme, la faune, la flore ou les bâtiments. Cette notion est très importante car, nombreux sont ceux qui ont tendance à cloisonner les problèmes environnementaux. Par exemple, une campagne en faveur de la préservation de la faune aquatique peut porter sur les rejets de métaux lourds d'une usine et négliger complètement l'effet de l'eutrophisation dû aux rejets importants de phosphates et nitrates.

Parallèlement, les flux de matières à traiter (ex : les « déchets municipaux », « la consommation d'énergie ») ou des activités humaines (ex : "l'agriculture", "l'industrie"), sont considérés comme des enjeux environnementaux majeurs alors qu'en fait, ce sont les procédés de traitement ou de production qui sont responsables de flux élémentaires¹, qui eux-mêmes, entraînent différents effets.

En matière de perception des enjeux environnementaux, la plupart des personnes ont donc des difficultés à :

(1) identifier :

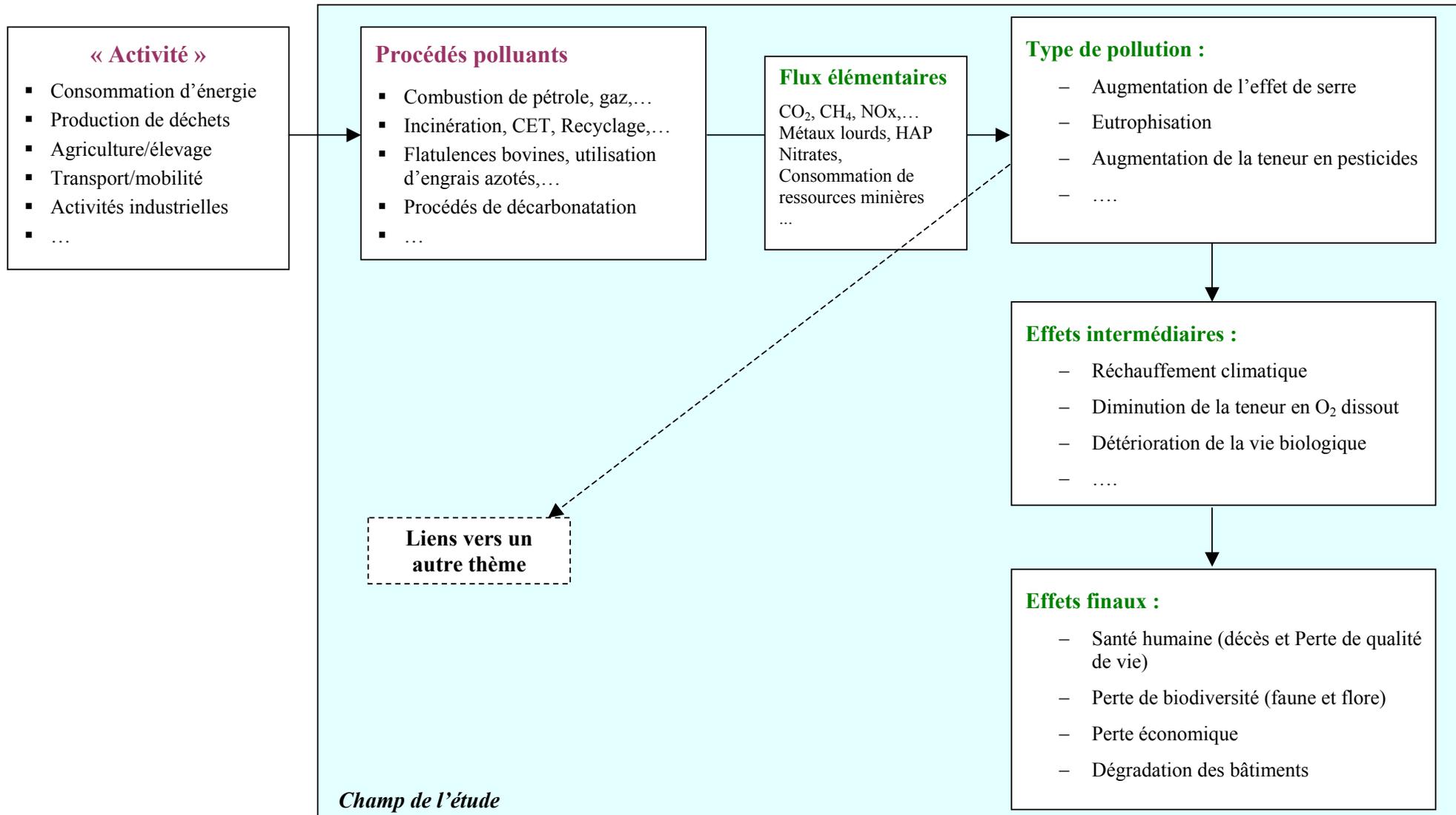
- un **lien entre un flux de matière** ou une activité humaine (exemple "les déchets", "la consommation d'énergie", "l'industrie",...) **et les flux élémentaires** engendrés par le ou les procédé(s) de traitement ou d'utilisation de cette matière,
- **les liens entre les flux élémentaires et les multiples conséquences** pour l'homme, la faune, la flore et les bâtiments.

(2) **mettre en perspective** un enjeu environnemental donné par rapport à d'autres, responsables de conséquences finales identiques. Dans ce cas, la difficulté est double car il faut pouvoir identifier les autres enjeux environnementaux mais aussi connaître leurs contributions relatives aux conséquences finales. Comme l'objectif de cette étude n'est pas de hiérarchiser les enjeux en fonction de leur importance, ce dernier point n'a pas été étudié.

Une présentation générique des chaînes d'effets partant d'une "activité" jusqu'aux effets finaux pour l'homme, la faune, la flore ou les bâtiments est reprise à la Figure 1 (page suivante).

¹ Matière ou énergie sortant du système étudié, et rejetée dans l'environnement sans transformation humaine ultérieure.

Figure 1 : Présentation générique des chaînes d'effets



On voit que différents niveaux de la chaîne séquentielle peuvent être perçus comme des enjeux environnementaux :

- Une **activité humaine** peut être perçue comme un enjeu environnemental, comme par exemple « la gestion des déchets ».
- Plus loin dans la chaîne, chacun des **procédés polluants** qui constituent cette activité peut être perçu comme un enjeu environnemental, comme par exemple « l'incinération des déchets ».
- Ensuite viennent les **flux élémentaires** (consommation de ressources ou émissions polluantes) générés par ces procédés, comme par exemple « l'émission de plomb ».
- Parfois, c'est un groupe de flux élémentaires qui contribuent au même **type de pollution** qui sont perçus ensemble comme un enjeu environnemental, comme par exemple les émissions de gaz à effet de serre (CO₂, le méthane...) qui contribuent à « l'augmentation de l'effet de serre ».
- Le plus souvent, ce sont les **effets intermédiaires** qui sont perçus comme un enjeu environnemental, comme par exemple le « réchauffement climatique » ou « les pluies acides ».
- Ces effets intermédiaires se traduisent enfin en **effets finaux** pour l'être humain (perte de durée de vie et perte de qualité de vie), la faune & la flore (biodiversité) et les constructions humaines (patrimoine). Signalons également que dans le cadre d'une vision anthropocentrique, on peut considérer que les effets sur la faune & la flore et les constructions humaines n'ont pas d'importance intrinsèque et qu'il faut considérer les effets indirects qu'ils causent sur l'**être humain**.

Chaque « enjeu environnemental » affectant l'être humain (qualité et durée de vie) peut être perçu différemment par les acteurs en fonction de préférences individuelles à caractère philosophique ou éthique :

- Dimension temporelle : Quelle importance relative donne-t-on aux effets présents par rapport aux effets pour les générations futures ? (effet de serre vs. impact sanitaire)
- Dimension géographique : Quelle importance relative donne-t-on aux effets qui concernent les humains qui nous sont proches par rapport aux effets qui concernent les humains éloignés géographiquement, que nous ne connaissons pas ? (un décès en France vs. un décès en Chine)
- Intensité : Quelle importance relative accorde-t-on à la qualité de la vie par rapport à la durée de vie ? Une vie de meilleure qualité mais plus courte est-elle préférable à une longue durée de vie mais avec plus de privations ? (effet positif de l'activité vs. effet négatif de la pollution qu'elle engendre)
- Dimension anthropocentrique : Quelle importance relative donne-t-on à la vie animale et végétale (en valeur intrinsèque) par rapport à la vie humaine ?
- Aversion au risque : Quelle importance relative donne-t-on aux effets certains par rapport aux effets incertains (mais à risque statistique plus faible) ?
- Dimension cumulative : Quelle importance relative donne-t-on au nombre de vies humaines par rapport à la qualité individuelle de chaque vie ?

Face à ces différentes visions de la notion d'enjeu environnemental, l'objectif de ce rapport est de :

- clarifier ces enjeux environnementaux en les structurant et en les détaillant
- définir la correspondance entre les enjeux identifiés et les méthodes d'évaluation environnementale.

Dans la suite de ce rapport, nous distinguerons d'une part les activités humaines et les procédés polluants associés et d'autre part les « **enjeux environnementaux** » à savoir : le type de pollution, les effets intermédiaires et les effets finaux. Dans les cartes de perception qui synthétisent l'information de chaque chapitre, les enjeux environnementaux sont repris en colonne à droite.

I.2. MÉTHODOLOGIE

Pour répondre aux objectifs de cette étude, la méthodologie a consisté à :

1. Identifier l'ensemble des enjeux environnementaux
2. Classer ces enjeux environnementaux par thème
3. Établir des "*cartes de perception des enjeux environnementaux*" et des tableaux de synthèse
4. Présenter et décrire les méthodes d'évaluations environnementales
5. Tirer des conclusions

1. Identifier l'ensemble des enjeux environnementaux

L'inventaire des enjeux environnementaux a été réalisé en se basant sur les documents suivants :

- ✓ Catégories d'impacts traitées par les ACV
- ✓ Thèmes abordés par les associations de défense de l'environnement (WWF, Greenpeace, France Nature et environnement...)
- ✓ Publications officielles des autorités publiques françaises, belges, canadiennes, américaines et européennes
- ✓ Rapports officiels sur l'état de l'environnement publiés par l'OCDE, le PNUD et la CE
- ✓ Publications diverses sur les enjeux environnementaux disponibles sur Internet.

2. Classer ces enjeux environnementaux par thème

Au premier niveau de classement, on a distingué 4 thèmes majeurs au sein desquels nous avons décrit les différents enjeux environnementaux:

- A. Changement climatique**
- B. Effets sur la nature et la biodiversité**
- C. Effets sur la santé humaine**
- D. Utilisation de ressources naturelles**

Ces 4 thèmes sont ceux repris par la Commission Européenne dans son : "*Sixième programme d'action pour l'environnement*" et couvrent l'ensemble des problématiques environnementales traitées dans les publications officielles (OCDE, PNUDE, ...).

NB : Intrinsèquement, le changement climatique n'est pas à sa place dans cette liste car il s'agit d'un problème situé plus en amont dans la chaîne d'effet et dont les effets se retrouvent dans les 3 autres thèmes. Il s'y retrouve néanmoins comme un thème majeur au même niveau que les impacts « finaux » en raison de la grande importance de ses effets.

Au sein de chaque thème, nous avons ensuite décrit les différents enjeux environnementaux en précisant pour chacun d'eux :

- **les causes principales** : procédés polluants impliqués
- **les principaux polluants** : flux élémentaires
- **les effets potentiels** : intermédiaires et finaux pour l'homme, la faune, la flore et les bâtiments
- **les liens vers d'autres enjeux environnementaux**

3. Établir des "cartes de perception des enjeux environnementaux" et des tableaux de synthèse

L'objectif de ces cartes est de synthétiser l'information contenue dans le rapport et de permettre à un lecteur de situer facilement l'enjeu environnemental qui l'intéresse au sein d'une problématique plus globale.

Les tableaux de synthèse reprennent quant à eux les caractéristiques des enjeux environnementaux associés à chaque thème :

- ✓ **Domaine d'application** :
 - L : local exclusivement (0 à 100 km)
 - LG : ni exclusivement local, ni exclusivement global
 - G : global exclusivement (globe terrestre)
- ✓ **Persistance de l'effet (si on supprime la source de pollution)** :
 - R : effet réversible à l'échelle d'une génération (0 – 10 ans)
 - RI : on ne connaît pas l'évolution à l'échelle d'une génération (10 – 30 ans)
 - I : effet irréversible à l'échelle d'une génération (> 30 ans)
- ✓ **État des connaissances scientifiques (élevé, moyen ou faible)**. Il s'agit d'un jugement subjectif sur la fiabilité des effets intermédiaires et des conséquences finales, basé sur l'analyse des publications sur le sujet.

Les cartes de perception des enjeux environnementaux ont été discutées avec une série d'acteurs issus :

- **des entreprises** : Informazout², Nestlé, Renault
- **des associations de défense de l'environnement** : Greenpeace, Inter-Environnement Bruxelles
- **des autorités publiques** : Cabinet du Ministre de l'environnement de la Région de Bruxelles-Capitale, Communauté Urbaine de Lille, Administration fédérale de l'environnement en Belgique

² Fédération belge regroupant les producteurs de pétrole.

Les objectifs de ces entretiens étaient, d'une part, de vérifier si les principaux problèmes environnementaux sont repris dans les cartes de perception des enjeux environnementaux et d'autre part, de discuter de l'intérêt des cartes pour aider chaque acteur à avoir une vision moins cloisonnée de l'environnement. Les commentaires sur les cartes et les tableaux de synthèse ont été pris en compte lors de la rédaction du présent rapport. Les autres commentaires sur l'intérêt et l'apport des cartes sont repris dans la conclusion 1 du chapitre IV.

4. Présenter et décrire les méthodes d'évaluations environnementales

Une fois les enjeux environnementaux correctement définis et identifiés, l'étape suivante consiste à évaluer correctement la contribution de l'activité humaine sur chacun d'eux. Pour ce faire, l'évaluateur dispose de différentes méthodes qui diffèrent par :

- les (types d')enjeux environnementaux pris en compte
- l'état des connaissances scientifiques
- leur difficulté de mise en œuvre.

Le choix de la méthode utilisée dépend :

- des objectifs poursuivis (communication, suivi interne, amélioration continue,...)
- des connaissances de l'évaluateur
- des données disponibles
- du temps et du budget disponible.

Pour aider l'évaluateur à choisir la méthode la plus appropriée en fonction de ces critères, nous présentons dans le chapitre III les méthodes d'évaluations suivantes :

- ✓ **L'Analyse du Cycle de Vie (ACV)**
- ✓ **L'évaluation des risques sanitaires**
- ✓ **L'évaluation des risques pour les écosystèmes**
- ✓ **La définition et la quantification d'indicateurs environnementaux**
- ✓ **L'empreinte écologique (comme exemple d'indicateur)**

Pour chaque méthode, nous avons décrit les principes méthodologiques, les enjeux environnementaux pris en compte, les principaux domaines d'application et les limites. Cette étape s'est basée sur les descriptions méthodologiques des méthodes disponibles dans la littérature scientifique et des contacts avec les experts et praticiens de ces méthodes.

NB : La définition et la quantification d'indicateurs environnementaux n'est pas une méthode d'évaluation au même titre que les 3 premières. Les 3 premières méthodes font l'objet d'une méthodologie générale bien précise à appliquer quel que soit le sujet de l'évaluation et présentent les résultats sous une forme bien déterminée. Par contre, les indicateurs sont des variables ou une fonction de variables (quantitative ou qualitative) dont la valeur est déterminée en appliquant des méthodes variables en fonction des sujets étudiés (mesure directe ou indirecte³ via des appareils de mesures ou des modèles mathématiques).

³ Recherche d'une valeur plus facilement accessible en lien direct avec la variable recherchée.

5. Conclusions

Finalement, nous avons établi une carte synthétique reprenant la logique de chaîne d'effet et juxtaposant les méthodes d'évaluation. Cette carte est accompagnée de conclusions sur la notion de perception des enjeux environnementaux et sur les avantages et limites de chaque méthode d'évaluation.

1.3. PERCEPTION DES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX

Dans les articles de journaux et les publications des institutions publiques nationales et internationales, le thème de l'environnement est souvent traité à différents niveaux sans établir de liens : flux de matière ou activité humaine → flux élémentaires → effets sur l'environnement → conséquences finales pour l'homme, la faune et la flore.

L'actualité internationale et les organisations d'ordre mondial abordent la problématique de l'environnement à partir des grands thèmes comme ceux repris dans le sixième programme cadre de la Commission Européenne :

- Réchauffement climatique
- Nature et biodiversité
- Environnement et santé et qualité de vie
- Ressources naturelles et déchets

Les sources sont :

- Commission Européenne⁴ (6^{ème} programme d'action communautaire pour l'Environnement)
- Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE)⁵
- Le programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD)⁶
- Le programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE)⁷
- La Banque Mondiale⁸
- ...

⁴ <http://www.europa.eu.int/comm/environment/newprg/index.htm>

⁵ <http://www.oecd.org/dataoecd/49/14/19830950.pdf>

⁶ <http://www.undp.org/french/TTFEnv-f.pdf>

⁷ <http://www.unep.org/french/>

⁸ <http://www.banquemondiale.org>

L'actualité nationale et les organisations qui traitent de sujets plus nationaux abordent des sujets ayant attrait pour des problèmes plus proches de la population en partant souvent des « activités » ou de « thème » plutôt que des procédés polluants :

- Gestion des déchets :
 - ménagers,
 - de construction,
 - dangereux,
 - ...
- Utilisation rationnelle de l'énergie
- Transport
- Pollution industrielle (accidentelle ou diffuse)
- Santé et environnement
- Gestion de l'eau
- Pollution agricole
- ...

Les organisations qui traitent de sujets plus nationaux sont :

- Ministère de l'Environnement⁹
- ADEME¹⁰
- Association de défense de l'environnement (exemple : Greenpeace¹¹)
- Mouvement politique¹²,
- Et journaux tels : *Actu-Environnement*¹³, *Science et Vie de la Terre*¹⁴

Enfin chaque région dispose de son journal et de ses groupes militants pour l'environnement. Puisque les régions ont des soucis différents les sujets diffèrent aussi. Les articles de journaux reprennent aussi les thèmes majeurs et appliquent les conséquences du changement de comportement à l'échelle locale :

Les organisations sont :

- ADEME
- Greenpeace
- Mairies
- Associations régionales
- Les mouvements régionaux écologistes :

⁹ <http://www.ecologie.gouv.fr/sommaire.php3>

¹⁰ http://www.ademe.fr/presse/Communiqués/cp2005/cp_2005_01_25priorite_ademe.htm#priorite

¹¹ http://www.greenpeace.org/belgium_fr

¹² <http://www.cap21.net>

¹³ http://www.actu-environnement.com/idx_ae.php4

¹⁴ http://www.clg-lespres.ac-versailles.fr/liens/liens5_sciences_et_techniques.htm

Exemple : L'actualité environnementale de la région de Picardie est montrée dans le tableau suivant¹⁵ :

Ordre d'importance par thème			
cap21-picardie	14%	Nanotechnologies	5%
Santé et environnement	11%	EUROPE	5%
Energie	11%	OGM	4%
Biodiversité	10%	Prévention des risques	4%
Eau	8%	Agriculture	4%
Déchets	8%	Société	4%
Qualité de l'air	6%	Transports	3%
Nucléaire	2%	Economie	2%

Au niveau régional ou local, la perception des enjeux environnementaux varie fortement en fonction des situations rencontrées. Cette tendance a été observée lors des interviews, lors desquelles, chaque interlocuteur se concentrait d'abord sur les problématiques qu'il connaît sans voir les liens avec d'autres problèmes environnementaux (au sein d'une même carte ou entre différentes cartes). A titre d'exemple, citons ce responsable d'une administration de l'environnement pour qui l'enjeu environnemental prioritaire est la "préservation de la biodiversité" et considère "l'augmentation de l'effet de serre", "l'eutrophisation", "l'augmentation de l'acidification des sols",... comme secondaires. L'analyse des cartes de perception des enjeux environnementaux, a permis une prise de conscience des liens entre ces types de pollution et la perte de biodiversité qu'il ne considérait qu'au travers les sujets traités quotidiennement (à savoir la destruction brutale de zones naturelles menacées suite à un implantation industrielle).

¹⁵ <http://cap21-picardie.over-blog.com/article-186617.html>

II. TYPOLOGIE DES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX

II.1. CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les trois enjeux environnementaux qui influencent le climat au niveau mondial et qui ont un effet persistant à long terme sont :

- L'augmentation de l'effet de serre
- La destruction de la couche d'ozone stratosphérique
- L'émission d'aérosols persistants¹⁶

II.1.1. AUGMENTATION DE L'EFFET DE SERRE

Les gaz à effet de serre permettent de retenir une partie de la chaleur apportée à la terre par le soleil en absorbant le rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre, par l'atmosphère elle-même et par les nuages. Une partie de ce rayonnement absorbé est ensuite ré-émis en direction du sol, contribuant ainsi au réchauffement des basses couches de l'atmosphère. C'est ce qu'on appelle **l'effet de serre naturel**. Sans lui, la température moyenne du globe serait de 35°C plus basse, soit -20°C au lieu de +15°C.

Ces dernières années, l'augmentation importante de la concentration de gaz à effet de serre a entraîné une plus grande opacité de l'atmosphère au rayonnement infrarouge et, par conséquent, une hausse de la température des basses couches de l'atmosphère. C'est ce qu'on appelle **l'effet de serre renforcé** qui est, selon les scientifiques¹⁷, responsable d'une hausse de la température moyenne de 0,6 °C ± 0,2 °C depuis la fin du XIXe siècle.

A Causes principales

Les augmentations des émissions des gaz à effet de serre (GES) sont principalement dues aux émissions de CO₂ lors de la **combustion des combustibles fossiles**, dans les voitures, les camions, les avions, les centrales électriques, les installations industrielles et le chauffage domestique. Parmi les autres sources de gaz à effet de serre, on trouve les émissions de méthane du **bétail** et de la production du gaz, les protoxydes d'azote (N₂O) des **sols agricoles**¹⁸, les émissions de méthane provenant des **déchets dans les décharges** ainsi que les émissions de gaz fluorés et chlorés (CFC, HFC, HCFC, PFC et SF₆) provenant des **mousses isolantes, frigos, climatisations, bombes aérosols et solvants**. Le phénomène de "smog photochimique" (cf. point 0, p.37) est également responsable de la production d'O₃ qui est le troisième GES "artificiel" après le CO₂ et le CH₄. Le déboisement et les changements d'affectation des sols contribuent également à la libération de CO₂ dans l'atmosphère, soit directement (feux de forêts ou brûlis), soit indirectement, par la réduction des grands massifs forestiers qui emprisonnent le carbone dans la biomasse.

¹⁶ Particules microscopiques suspendues dans l'air d'origine naturelle ou anthropique ≠ des bombes aérosols contenant des CFC ou des HFC.

¹⁷ IPCC : Bilan 2001 des changements climatiques : Rapport de synthèse.

¹⁸ En l'absence d'oxygène, les bactéries présentent dans le sol vont transformer les engrais azotés en N₂O.

B Principaux polluants

Gaz à effet de serre direct :

Les gaz qui contribuent le plus à l'effet de serre sont :

- La vapeur d'eau (H₂O),
- Le gaz carbonique (CO₂).
- Le méthane (CH₄),
- Le protoxyde d'azote (N₂O),
- L'ozone (O₃),

Le méthane, le CO₂ et le protoxyde d'azote sont pris en compte dans les accords internationaux (protocole de Kyoto), mais pas l'ozone ni la vapeur d'eau, dont la concentration atmosphérique est régulée par des phénomènes climatologiques plus que par les émissions humaines. Les principaux autres gaz à effet de serre pris en compte dans le protocole de Kyoto sont :

- Hydrocarbures fluorés (HFCs)
- Chlorofluorocarbone (CFCs)
- Composés Fluorés (SF et CF)
- Éthers et éthers halogénés (HCFE, HFE, HG)

Gaz à effet de serre indirect :

Plusieurs gaz chimiquement réactifs, notamment les oxydes d'azote réactifs (NO_x), le monoxyde de carbone (CO) et les composés organiques volatils (COV) jouent également le rôle de gaz à effet de serre indirect en raison de l'influence qu'ils exercent non seulement sur la production d'ozone, mais aussi sur la destruction du CH₄ et d'autres gaz à effet de serre.

- **Le monoxyde de carbone** est un gaz à effet de serre indirect qui s'oxyde progressivement en CO₂. Le CO entraîne une augmentation de l'ozone troposphérique en combinaison avec le N₂O et les COV. Le CO influe également sur le pouvoir d'oxydation de l'atmosphère terrestre et contribue de ce fait à augmenter les concentrations de méthane et d'oxydes nitreux. D'après les calculs sur modèles, pour ce qui concerne les perturbations dues aux gaz à effet de serre, l'émission de 20 tonnes de CO équivaut à une émission de 1 tonne environ de CH₄¹⁹.
- **Les oxydes d'azote** réactifs NO et NO₂ (regroupés sous l'appellation NO_x) sont des composés clés dans la chimie de la troposphère, quoique leur effet radiatif global reste difficile à chiffrer. L'importance des NO_x dans le bilan radiatif tient au fait que l'accroissement de leur concentration a des répercussions sur plusieurs gaz à effet de serre et peut par exemple entraîner une diminution du méthane et des HFC et une augmentation de l'ozone troposphérique. Les dépôts des produits de réaction des NO_x fertilisent la biosphère et font baisser la concentration de CO₂ dans l'atmosphère par accroissement de la biomasse.

¹⁹ Source : « Bilan 2001 des changements climatiques : les éléments scientifiques », Rapport du Groupe de travail I du GIEC.

C Effets potentiels

La conséquence directe de l'augmentation de l'effet de serre est **l'augmentation de la température moyenne à la surface du globe**. Les scientifiques estiment que, depuis la fin du XIXe siècle, la température moyenne a augmenté de $0,6 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

De plus, tout facteur qui modifie le rayonnement solaire ou celui qui est renvoyé dans l'espace, ou encore qui modifie la redistribution de l'énergie dans l'atmosphère ou entre l'atmosphère, les terres émergées et les océans, va influencer sur le climat.

Les perturbations observées du système climatique et reprises dans le rapport de l'IPPC : "*Bilan 2001 des changements climatiques*" sont :

- Augmentation des précipitations et de l'humidité atmosphérique
 - ⇒ La hauteur annuelle de précipitation pour les terres émergées a continué d'augmenter aux latitudes moyennes et élevées de l'hémisphère Nord (très probablement à un rythme de 0,5 à 1 % par décennie), sauf en Asie orientale. Il est également probable que la quantité totale de vapeur d'eau atmosphérique a augmenté de plusieurs % par décennie dans de nombreuses régions de l'hémisphère Nord.
- Diminution de l'enneigement et de l'étendue des glaces terrestres
 - ⇒ Il existe toujours une corrélation positive entre la diminution de l'étendue de la couverture neigeuse et des glaces terrestres et la hausse des températures à la surface du sol. Entre la période 1958-1976 et le milieu des années 90, il y a probablement eu une diminution d'environ 40 % de l'épaisseur des glaces de mer Arctiques pour la période comprise entre la fin de l'été et le début de l'automne. Cette diminution n'a pas été observée dans l'Antarctique.
- Augmentation du niveau de la mer
 - ⇒ Le niveau moyen des mers s'est élevé au XXe siècle de 1,0 à 2,0 millimètres par an, la valeur centrale s'établissant à 1,5 millimètre par an . Ce rythme est 10 fois supérieur au rythme des 3000 dernières années.
- Changement de la circulation atmosphérique et de la circulation des courants marins
 - ⇒ Depuis le milieu des années 70, le phénomène El Niño²⁰ ou ENSO a eu un comportement inhabituel par rapport aux 100 années précédentes, les épisodes correspondant à sa phase chaude étant relativement plus fréquents, persistants et intenses que ceux qui correspondent à sa phase froide. Ce comportement récent se traduit par des variations de la pluviosité et de la température sur une grande partie des zones tropicales et subtropicales et a probablement concouru, quoique dans une faible proportion, à la hausse des températures mondiales durant les dernières décennies.

²⁰ *Le phénomène El Niño est la plus forte fluctuation naturelle du climat à une échelle de temps interannuelle. A l'origine, ce phénomène désignait un courant océanique chaud de faible intensité qui, chaque année, aux alentours de Noël, longeait la côte péruvienne en direction du sud..*

- Variabilité du climat et des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes
 - ⇒ Selon toute probabilité, la fréquence des fortes précipitations a augmenté de 2 à 4 % durant la seconde moitié du XXe siècle. Dans certaines régions, notamment dans certaines parties de l'Asie ou de l'Afrique, on a observé une augmentation de la fréquence et de l'intensité des épisodes de sécheresse depuis quelques décennies. Depuis 1950, il est fort probable que, presque partout, la fréquence des températures moyennes saisonnières très nettement inférieures à la normale s'est considérablement réduite et que la fréquence des températures saisonnières très nettement supérieures à la normale a par contre beaucoup moins augmenté.

NB : Des analyses récentes portant sur l'évolution des phénomènes météorologiques violents de portée locale (tornades, orages et grêle) dans certaines régions n'apportent pas de preuves irréfutables d'un changement durable.

Les implications de toute cette évolution pour la société et la biodiversité peuvent être dévastatrices.

Ces changements climatiques peuvent déstabiliser l'équilibre d'un écosystème en provoquant des mouvements de milliers d'espèces qui ne seront plus adaptées aux nouvelles conditions. Dans certaines régions du monde, les sécheresses accrues et l'effondrement de l'agriculture pourraient menacer la sécurité et la stabilité sociale. Le tableau des maladies pourrait également en être modifié dans le monde entier (propagation des maladies tropicales et subtropicales dans des régions qui au départ étaient moins chaudes). De plus, même si il n'existe pas encore de preuve d'une augmentation de la fréquence des phénomènes météorologiques violents, signalons tout de même que, à l'échelle de l'humanité, une moyenne de 200 millions de personnes sont touchées chaque année par les catastrophes naturelles dont 80 000 périssent (Science & Vie, 2003). En 2001, l'OMS a estimé que les perturbations climatiques ont été responsables de 150.000 décès dans le monde²¹.

D Liens vers d'autres enjeux environnementaux

L'augmentation de l'effet de serre va accélérer l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique. Les scénarios du réchauffement planétaire prévoient des températures plus hautes au niveau de la troposphère²² mais plus basses au niveau de la stratosphère²³, donc plus de nuages stratosphériques polaires et davantage de chlore actif dans la région du trou d'ozone.

II.1.2. DESTRUCTION DE LA COUCHE D'OZONE STRATOSPHERIQUE

A Causes principales

La couche d'ozone agit comme un filtre naturel qui protège toutes les formes de vie de l'effet nocif des rayons ultraviolets (UV) émis par le soleil. L'ozone se forme dans l'atmosphère lorsque les rayons solaires frappent des molécules d'oxygène (O₂) et les scindent en deux atomes. Si un des atomes ainsi libérés rencontre une molécule d'oxygène (O₂), il se joint à elle et forme de l'ozone (O₃). L'ozone se dissocie naturellement dans l'atmosphère au contact des rayons solaires et sous l'effet d'une réaction chimique engageant diverses substances qui contiennent de l'azote, de l'hydrogène et du chlore. Dans une atmosphère non polluée, il s'établit un équilibre dynamique entre la production d'ozone et la destruction d'ozone. En conséquence, la concentration totale d'ozone dans la stratosphère demeure relativement constante.

Ces dernières années, l'activité humaine a modifié cet équilibre dynamique en rejetant de nombreuses substances appauvrissant la couche d'ozone (cf. B.2. Principaux polluants).

²¹ OMS - The world health report 2002.

²² Région de l'atmosphère qui va du sol jusqu'à 8 à 16 km d'altitude.

²³ La couche qui va de la troposphère jusqu'à 50 km et où se situe la couche d'ozone.

Une fois arrivées dans la stratosphère, ces molécules, sous l'effet des rayons UV-C, libèrent du chlore (CFC, 1,1,1-trichloroéthane et tétrachlorométhane) ou du brome (halons et bromométhane) qui, à leur tour, décomposent l'ozone (O_3). Le chlore et le brome activent tous les deux les réactions de destruction de l'ozone sans être eux-mêmes modifiés ou détruits. Ils jouent un rôle de catalyseur. Ainsi, un seul atome de chlore peut détruire jusqu'à 100 000 molécules d'ozone avant de former un composé stable et de disparaître de la stratosphère.

B Principaux polluants

Les substances appauvrissant la couche d'ozone contiennent diverses combinaisons d'éléments chimiques, à savoir le chlore, le fluor, le brome, le carbone et l'hydrogène, et sont souvent décrites par un terme général, les halocarbures.

Les composés qui ne contiennent que du chlore, du fluor et du carbone sont appelés chlorofluorocarbures, ou CFC et sont considérées comme les principaux responsables de la destruction de la couche d'ozone.

En dehors des CFC, il existe d'autres halocarbures comme les :

- Bromochlorométhane (BCM)
- Tétrachlorure de carbone
- Hydrobromofluorocarbures (HBFC)
- Hydrochlorofluorocarbures (HCFC)
- Bromure de méthyle
- Méthylchloroforme
- Halons

Les CFC sont utilisés dans différents secteurs comme la réfrigération, la climatisation, le gonflement de mousses, le nettoyage de composants électroniques, et enfin comme solvants. Les émissions de CFC représentent environ 80% de l'amincissement total de l'ozone stratosphérique. Heureusement, le monde développé a éliminé l'utilisation des CFC en réponse aux accords internationaux pour protéger la couche d'ozone. Cependant, parce que les CFCs restent dans l'atmosphère tellement longtemps, la couche d'ozone ne se réparera pas entièrement avant au moins le milieu du 21ème siècle.

En ce qui concerne les autres substances, on notera en particulier les systèmes d'extinction d'incendie qui contiennent des halons et les fumigants et pesticides qui contiennent du bromure de méthyle.

A côté de ces substances liées à l'activité de l'homme, d'autres facteurs influencent la concentration d'ozone :

- **Les explosions volcaniques** qui larguent des quantités importantes d'aérosols ainsi qu'un peu de chlore dans la stratosphère inférieure.
- **Les vents stratosphériques tropicaux.** qui déplacent l'ozone sans le détruire. La perte d'ozone à une latitude est compensée par le gain à une autre, les effets s'annulant à l'échelle de la planète.
- **Le cycle des taches solaires.** Ce cycle de 11 années est lié aux changements magnétiques à l'intérieur du soleil. Ces changements magnétiques augmentent la production du rayonnement UV.

Note complémentaire :

Il faut également signaler que le développement de l'**hydrogène** comme vecteur énergétique est susceptible d'engendrer des trous importants dans la couche d'ozone au-dessus des pôles. En effet, en raison de la très petite taille de l'hydrogène, il est pratiquement impossible d'assurer l'étanchéité des systèmes de production, stockage ou de transport. Une partie de l'hydrogène se perd donc dans l'atmosphère et, du fait de sa légèreté, remonte rapidement dans la stratosphère où il réagit avec l'oxygène pour donner de l'eau. Une économie basée sur l'hydrogène rendrait la stratosphère plus humide et plus froide. Il en résulterait une réduction de la quantité d'ozone de 5 à 8 % au-dessus du Pôle Nord et de 3 à 7 % au-dessus du Pôle Sud. Ces hypothèses se basent sur les récents travaux des chercheurs du California Institute of Technology aux Etats-Unis mais font l'objet de nombreuses critiques au sein de la communauté scientifique.

NB : les discussions sur l'effet global du passage d'une économie basée sur les combustibles fossiles à une économie basée sur l'hydrogène produite à partir d'énergie renouvelable sont actuellement en cours au sein de la communauté scientifique et de nombreuses recherches doivent encore être menées sur le sujet.

Références utiles :

- Geophysical research letters, vol. 31, 105107, 2004 : "*Impact of a hydrogen economy on the stratosphere and troposphere studied in a 2-D model*".
- Science, Vol 300, Issue 5626, 1740-1742 , 13 June 2003 : "*Potential Environmental Impact of a Hydrogen Economy on the Stratosphere*".

C Effets potentiels

L'appauvrissement de la couche d'ozone et donc une pénétration accrue du rayonnement UV entraîne:

- une augmentation de la température de la surface du globe due à :
 - ⇒ l'effet direct du rayonnement UV qui atteint la surface de la terre
 - ⇒ l'intensification des réactions de production d'ozone troposphérique (qui est un GES)
- une tendance au refroidissement due à :
 - ⇒ l'accentuation du rythme auquel sont éliminés les GES tels que le CH₄.

Durant les 20 dernières années, le bilan global de ces phénomènes a entraîné un forçage radiatif néгатif de $0,16 \pm 0,1 \text{ W/m}^2$ (c'est-à-dire une tendance au refroidissement).

D Interaction avec d'autres types de pollution

Les rayons ultraviolets (en particulier les UV-B) causent le cancer de la peau, accélèrent le vieillissement de la peau, sont nocifs pour les yeux (cataracte) et risquent d'affaiblir le système immunitaire. Ces rayons ont également un effet sur le processus de croissance de pratiquement toutes les plantes vertes et peuvent, à terme, entraîner la disparition de certaines espèces.

II.1.3. AUGMENTATION DE LA TENEUR EN AÉROSOLS

Les aérosols sont des particules microscopiques suspendues dans l'air d'origine naturelle (volcans, feux de forêts, tempêtes de sable ou de poussières,...) ou anthropique (combustion de combustibles fossiles et de biomasse principalement). Les activités humaines sont responsables d'environ 10% de la quantité d'aérosols présents dans l'atmosphère.

Les aérosols présents dans la stratosphère sont responsables d'un forçage radiatif négatif (diminution de la température à la surface du globe) en renvoyant une partie des rayons du soleil dans l'espace. L'amplitude de cet effet de refroidissement dépend de la composition et de la taille des particules. Outre leur forçage radiatif direct, les aérosols ont un forçage radiatif indirect en agissant comme noyau de condensation pour la formation de nuages ou la modification des propriétés optiques et de la durée de vie des nuages. Il existe aujourd'hui davantage d'éléments de preuve de l'existence de cet effet indirect, qui est négatif, mais dont l'ampleur reste très incertaine.

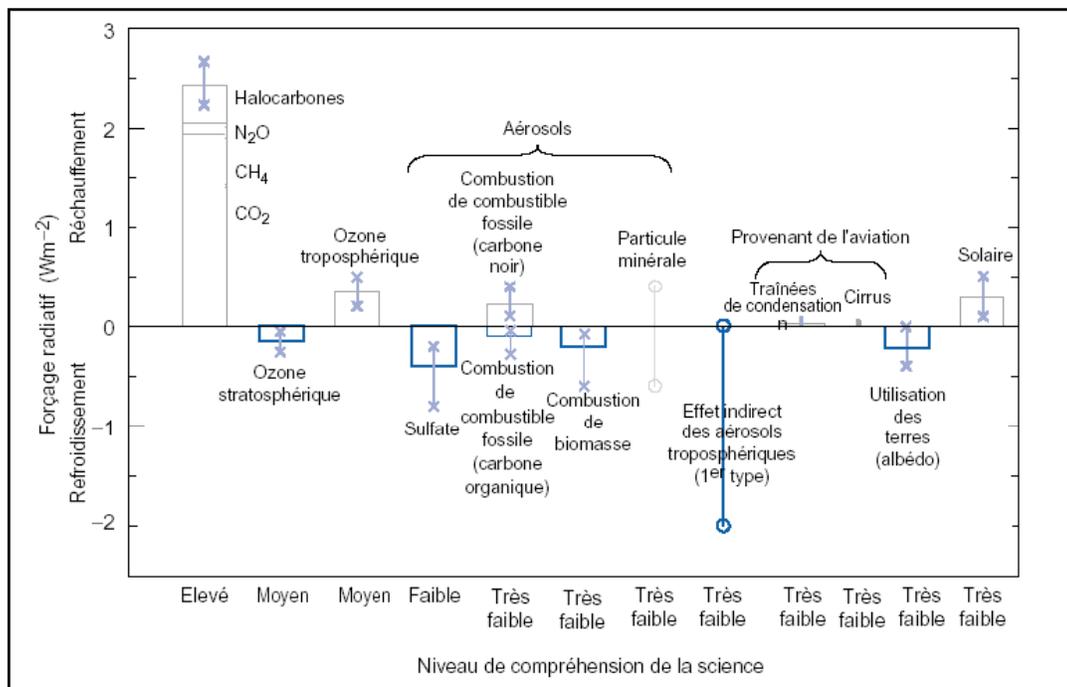
Les recherches sur les aérosols sont relativement récentes et des questions subsistent sur les zones où les concentrations d'aérosols augmentent, diminuent ou stagnent et sur l'ampleur et le sens du forçage radiatif.

A Synthèse

La Figure 2 reprend les forçages radiatifs (W/m^2) annuels moyens dans le monde, découlant d'un certain nombre d'agents, de la période pré-industrielle (1750) au présent (vers 2000).

Le tableau de synthèse et la carte de perception des enjeux environnementaux sont repris en fin de paragraphe.

Figure 2 : Facteurs de forçage à l'origine des changements climatiques



Source : IPCC 2001 – Bilan 2001 des changements climatiques

La hauteur de la barre rectangulaire indique une valeur centrale ou la meilleure estimation, son absence indique l'impossibilité d'obtenir la meilleure estimation. La ligne verticale dans les rectangles délimitée par des X indique un forçage pour lequel aucune estimation centrale n'est possible en raison d'incertitudes importantes. Une mesure du "niveau de compréhension de la science", allant d'élevé à moyen, à faible et à très faible, est associée à chaque forçage. Ces mesures représentent un jugement subjectif sur la fiabilité des estimations de forçage. Les gaz à effet de serre bien brassés sont regroupés dans la même barre rectangulaire, indiquant les contributions moyennes respectives des CO₂, CH₄, N₂O et halocarbones.

La combustion des combustibles fossiles est divisée en combustion de "carbone noir²⁴" et combustion de "carbone organique", avec leurs meilleures estimations et leurs fourchettes respectives. Le signe des effets dus aux particules minérales est en lui-même une incertitude. Le forçage indirect dû aux aérosols troposphériques est mal connu. Il en est de même du forçage de l'aviation, dû à ses effets sur les traînées de condensation et les cirrus.

Le Tableau 1 reprend les caractéristiques des enjeux environnementaux associés au thème : "Changement climatique".

Tableau 1 Caractéristiques des enjeux environnementaux associés au thème : "changement climatique"

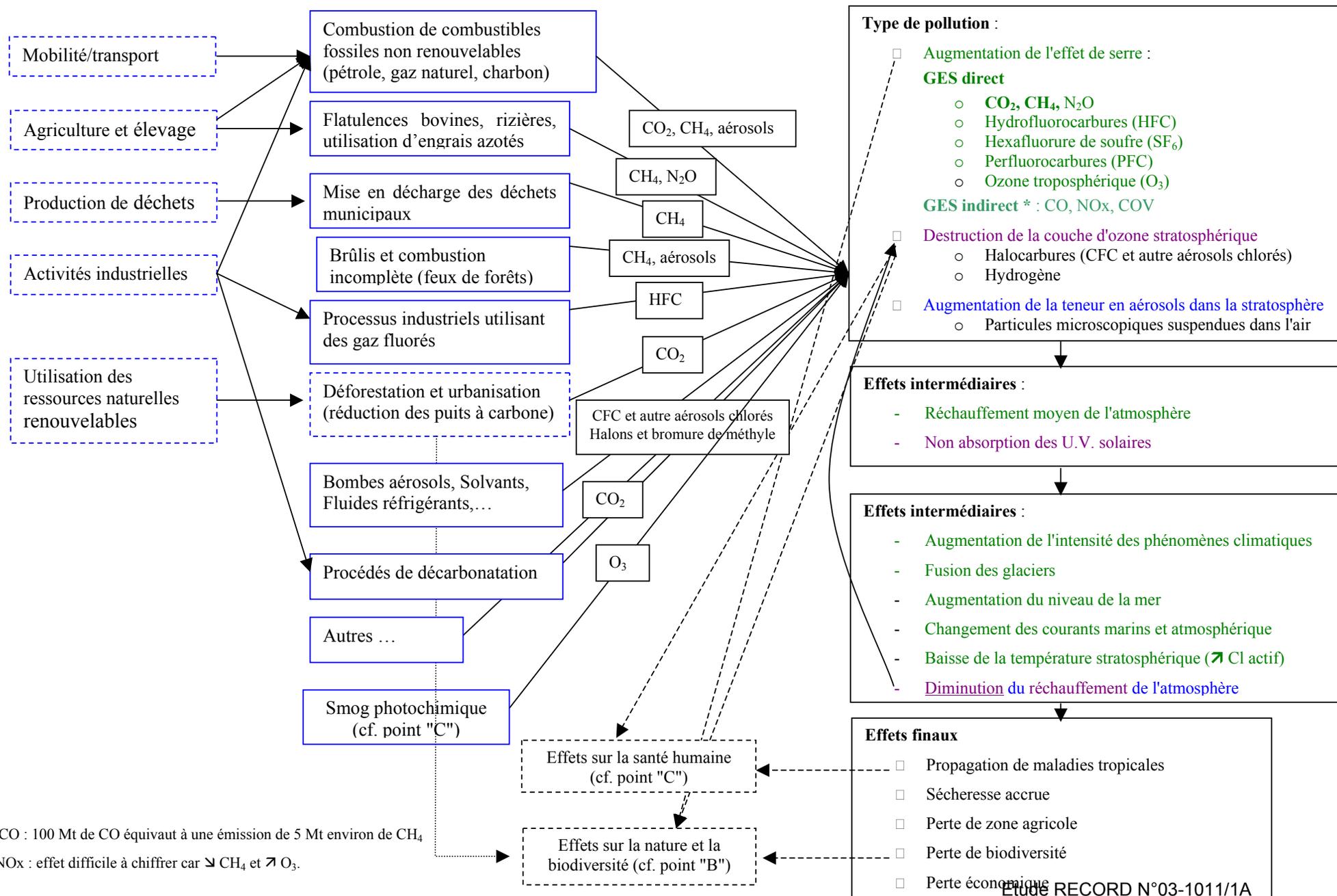
Description des enjeux environnementaux		Caractéristiques des enjeux environnementaux		
Flux élémentaires	Type de pollution	Domaine d'application	Persistance de l'effet	Etat des connaissances scientifiques
GES directs : CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFC, CF, SF, HFE, HG, O ₃ GES indirects : CO, NOx, COV	Augmentation de l'effet de serre	G	I	Moyen
Halocarbure : CFC et autres aérosols chlorés Hydrogène	Destruction de la couche d'ozone	G	RI ou I	Moyen Faible concernant l'H ₂
Particules microscopiques suspendues dans l'air Suies, sulfates, Particules organiques Poussières minérales	Augmentation de la teneur en aérosols	G	RI ou I	Faible

La carte de perception des enjeux environnementaux associés au thème "changement climatique" est reprise à la Figure 3 .

Les codes couleurs permettent de suivre la chaîne d'effet depuis le « type de pollution » jusqu'aux effets finaux qui sont les conséquences des différents types de pollution.

²⁴ Particules, suies provenant de la combustion incomplète

Figure 3 : Carte de perception des enjeux environnementaux associés au thème : "Changement climatique"



* CO : 100 Mt de CO équivaut à une émission de 5 Mt environ de CH₄

NO_x : effet difficile à chiffrer car ↘ CH₄ et ↗ O₃.

II.2. EFFETS SUR LA NATURE ET LA BIODIVERSITÉ

Les effets sur la nature et la biodiversité comprennent **la perte de biodiversité** et **l'altération du paysage** causées par l'activité humaine.

L'altération du paysage suite à des modifications physiques des espaces (urbanisation, déforestation, construction de routes, industrialisation,...) va avoir un effet direct sur la qualité de vie des habitants et entraîner des retombées économiques négatives (tourisme, baisse de la valeur vénale des terrains).

La diversité biologique, ou biodiversité, fait référence à la variété dans les organismes vivants, tant au niveau génétique qu'au niveau des interactions entre eux. Puisque tous les organismes sont interdépendants, toute perte de biodiversité (i.e. toute extinction d'espèce) résulte en la fragilisation du système entier (exemple : les menaces qui pèsent actuellement sur l'équilibre de grands écosystèmes comme la forêt tropicale). D'autre part, une perte de biodiversité entraîne une fragilisation (voir un risque de disparition) des écosystèmes de par l'uniformisation du patrimoine génétique. Par analogie, on peut comparer ce phénomène aux systèmes de communication dans les entreprises : si on supprime tous les moyens de communication (téléphone, fax, courrier,...) autres que le courriel, l'activité de l'entreprise peut être bloquée (voir disparaître) en cas de virus informatique.

La diversité biologique assure également un rôle éducatif, culturel, récréatif et esthétique, et constitue un patrimoine génétique utile pour la recherche.

Les types de pollution ayant des effets sur la nature et la biodiversité sont multiples et l'on peut considérer que tous les enjeux environnementaux (en dehors des nuisances directes pour l'homme comme le bruit et les odeurs) entraînent un risque pour une ou plusieurs espèces animales ou végétales. Dans cette partie, nous avons classé les différents enjeux environnementaux en fonction des compartiments de l'environnement (Eau, Air ou Sol) qui assurent la transmission des polluants vers les différentes espèces.

En dehors des dommages causés au milieu naturel, l'introduction d'organismes génétiquement modifiés (OGM) est une menace nouvelle pour la biodiversité. Étant donné leur spécificité et les enjeux importants pour la santé humaine, les OGM sont traités au paragraphe II.3 – point D).

II.2.1. VECTEUR DE TRANSMISSION – EAU

Il faut distinguer la pollution des eaux souterraines de la pollution des eaux de surface bien que ces deux types de pollutions soient liés.

La pollution des eaux souterraines a essentiellement un impact sur la santé humaine (cf. C. Santé humaine) et sur la disponibilité en eau potable (cf. D : Utilisation des ressources naturelles).

La pollution des eaux de surface va entraîner des effets multiples sur la faune et la flore ainsi que sur la qualité de vie de l'homme (qualité des eaux de baignade, réduction des zones de pêche ou risque pour la santé humaine en cas d'ingestion).

A Causes principales

L'activité humaine, qu'elle soit industrielle (chimie, papeterie, industrie agroalimentaire, etc.), urbaine (usages domestiques, commerce, entretien des rues), ou agricole (utilisation d'engrais et de pesticides), produit quantité de substances polluantes de toutes natures qui sont à l'origine de différents types de pollutions : des pollutions organiques (essentiellement d'origine animale),

chimiques (fertilisants, pesticides, métaux, détergents...), biologiques (bactéries, virus et autres champignons), ou encore radioactives. Les causes de la pollution aquatique sont difficilement identifiables car les polluants peuvent être émis dans l'atmosphère, épandus sur les sols ou évacués directement dans les eaux usées avant d'être dissout et de se retrouver dans les eaux souterraines ou de surface.

B Types de pollution et effets potentiels

On distingue divers types de pollutions :

- La pollution par les matières organiques
- La pollution microbiologique
- La pollution par les hydrocarbures
- La pollution par les pesticides
- La pollution par les nitrates des eaux souterraines
- L'eutrophisation des eaux de surface (apport excessif en nitrates et phosphates)
- La pollution métallique
- La modification des paramètres physico-chimique de l'eau (T°, Salinité et PH)
- La pollution par les déchets solides

Chaque pollution peut être :

- **ponctuelle** : elle provient de sources bien identifiées (rejets domestiques ou industriels, effluents d'élevage...) ou **d'événements directs** et dramatiques tels que la catastrophe de Baia Mare en Roumanie (du cyanure et des métaux lourds ont coulé d'une mine d'or dans la rivière et causé la destruction massive de la nature) ou encore les marées noires
- **ou diffuse** : comme celle due aux épandages de pesticides et d'engrais sur les terres agricoles. Elle concerne l'ensemble d'un bassin versant, met plus de temps à atteindre les milieux aquatiques et ne peut être traitée qu'à la source en diminuant l'usage des substances responsables.

Pollution par les matières organiques

Les matières organiques ont longtemps été les principaux polluants des milieux aquatiques. Elles proviennent des déchets domestiques (ordures ménagères, excréments), agricoles (lisiers) ou industriels (papeterie, tanneries, abattoirs, laiteries, huileries, sucreries...), lorsque ceux-ci sont rejetés sans traitement préalable. Certaines substances organiques sont facilement biodégradables et peuvent donc être décomposées et éliminées grâce aux capacités naturelles d'auto-épuration des milieux aquatiques. Mais, lorsqu'elles sont en excès, leur décomposition peut entraîner l'asphyxie de la faune aquatique. Ce sont les poissons qui souffrent le plus du manque d'oxygène, les invertébrés étant moins affectés²⁵, et les bactéries encore moins. En cas de forte pollution, la vie végétale aussi tend à disparaître. Les micropolluants organiques comme les : organo-halogénés (ex : le chloroforme) peuvent également entraîner des risques de toxicité immédiate (effets mutagènes et cancérogènes).

²⁵ Mis à part certains invertébrés utilisés comme indicateurs polluo-sensibles (exemple : famille des éphémères ou des plécoptères).

La pollution microbiologique

Les déchets organiques, en particulier les excréments, contiennent des germes pathogènes (virus, bactéries ou parasites) véhiculés par l'eau. Ces germes peuvent provoquer des maladies comme le choléra, la typhoïde, la dysenterie... Aujourd'hui, cette pollution des eaux continentales a fortement diminué dans les pays industrialisés grâce à la mise en service de stations d'épuration qui assurent le nettoyage des eaux usées avant leur rejet dans la nature. Mais cela n'est pas le cas des pays en développement où elle provoque encore des morts innombrables.

Pollution par les hydrocarbures

Les hydrocarbures, bien que biodégradables, peuvent avoir des effets toxiques importants sur la flore et la faune aquatiques (principalement les oiseaux, et les mammifères marins) lorsqu'ils sont présents en fortes quantités :

- *Hypothermie* : quand un oiseau entre en contact avec un produit pétrolier, le mazout colle aux plumes, laissant les eaux froides passer au travers des plumes externes et détremper la couche de duvet. À mesure que l'oiseau s'efforce de maintenir sa chaleur corporelle, il brûle ses réserves de graisse. Sans aide, l'animal finira par mourir d'hypothermie
- *Noyade* : peut être causée par le poids des hydrocarbures sur les plumes ou une réduction de l'air retenu dans le plumage
- *Empoisonnement* : quand l'oiseau essaie de nettoyer le pétrole sur ses plumes en les lissant ou s'il se nourrit d'aliments contaminés, il ingère ou inspire du pétrole.
- *Irritation ou ulcération* : peut causer des dommages à la peau, aux yeux, à la bouche ou aux cavités nasales.

Les pollutions par les hydrocarbures sont également responsables de risques sanitaires pour l'homme liés aux opérations de nettoyage des côtes et des oiseaux.

Pollution par les pesticides

Les pesticides (insecticides, raticides, fongicides et herbicides) sont des composés chimiques dotés de propriétés toxicologiques, utilisés par les agriculteurs pour lutter contre les animaux (insectes, rongeurs) ou les plantes (champignons, mauvaises herbes) jugés nuisibles aux plantations.

Une grande partie d'entre eux est dispersée dans l'atmosphère, soit lors de leur application, soit par évaporation ou par envol à partir des plantes ou des sols sur lesquels ils ont été répandus. Disséminés par le vent et parfois loin de leur lieu d'épandage, ils retombent avec les pluies directement sur les plans d'eau et sur les sols d'où ils sont ensuite drainés jusque dans les milieux aquatiques par les eaux de pluie (ruissellement et infiltration). Les pesticides sont ainsi aujourd'hui à l'origine d'une pollution diffuse qui contamine toutes les eaux continentales : cours d'eau, eaux souterraines et zones littorales.

Estimer les effets sur les écosystèmes d'une pollution liée aux pesticides s'avère difficile, car il existe des milliers de pesticides et leurs comportements sont très divers. Leur impact dépend à la fois de leur mode d'action (certains sont beaucoup plus toxiques que d'autres), de leur persistance dans le temps (certains se dégradent beaucoup plus rapidement que d'autres) et de leurs sous-produits de dégradation.

Pollution par les nitrates

En France, la présence de nitrates dans les eaux continentales provient à 66 % de l'agriculture, du fait de la différence entre les apports en nitrates sous forme d'engrais et de lisier (effluents d'élevage) et les besoins réels des plantes. Le reste est issu des rejets des collectivités locales (22 %) et de l'industrie (12 %). Très solubles dans l'eau, les nitrates constituent aujourd'hui la cause majeure de pollution des grands réservoirs d'eau souterraine du globe. Alors qu'en l'absence de contamination, la teneur en nitrates des eaux souterraines varie de 0,1 à 1 milligramme par litre d'eau²⁶, elle dépasse souvent aujourd'hui la norme retenue pour les eaux potables par l'Organisation mondiale de la santé (50 milligrammes par litre). Désormais, de telles eaux nécessitent un traitement spécifique pour pouvoir être consommées. L'apport excessif de nitrate dans les cours d'eau participe également au phénomène d'eutrophisation (cf. ci-dessous).

La pollution des eaux par les nitrates présente donc un double risque :

- **Effets toxiques** sur la santé humaine par accumulation dans les eaux souterraines,
- Modification de l'équilibre biologique des milieux aquatiques en provoquant des phénomènes **d'eutrophisation**.

Eutrophisation (nitrates + phosphates)

En France, les phosphates rejetés dans l'environnement proviennent, à parts sensiblement égales, de sources agricoles (engrais) et industrielles, de déjections humaines et de détergents ou lessives phosphatées. En Europe de l'Ouest, la pollution ponctuelle par les phosphates est estimée à 3,5 grammes par habitant et par jour : 1,2 gramme provient des excréments humains, et le reste surtout des détergents. En matière de pollution diffuse, on estime que 0,5 à 2,5 % du phosphore des engrais utilisés est entraîné par l'eau, lors du lessivage des sols cultivés par les eaux de pluie et de drainage.

Les phosphates sont, au même titre que les nitrates, les principaux responsables des phénomènes d'eutrophisation. En dehors de ce phénomène, les phosphates sont peu toxiques en eux-mêmes pour la vie animale et végétale.

L'eutrophisation est définie comme : "*un déséquilibre d'un écosystème dû à un excès de nutriments et de matières organiques biodégradables, qui se traduit par une croissance excessive des algues et une diminution de l'oxygène dissout*". Ces nutriments sont principalement les phosphates et les nitrates, mais aussi l'ammoniac issu de la décomposition des effluents organiques par des bactéries aérobies. On observe alors une différence de plus en plus marquée entre les eaux proches de la surface, très oxygénées, et les eaux profondes, totalement désoxygénées et non éclairées, car la prolifération des algues en surface empêche toute pénétration de lumière. Dans ces profondeurs, la vie disparaît peu à peu : les espèces animales et les bactéries aérobies meurent asphyxiées. Au bout d'un certain temps, seules les bactéries anaérobies survivent dans ce milieu dépourvu d'oxygène : elles se multiplient et provoquent la fermentation de toute la matière organique accumulée, libérant des gaz nauséabonds (hydrogène sulfuré et ammoniac) et du méthane. Une autre conséquence de l'eutrophisation est le développement d'algues toxiques ayant un effet sur la santé humaine, la faune ou la flore.

²⁶ Dans certaines conditions, un taux naturel supérieur à 1 milligramme par litre d'eau peut être observé.

Pollution métallique

La pollution métallique peut être due à différents métaux comme l'aluminium, l'arsenic, le chrome, le cobalt, le cuivre, le manganèse, le molybdène, le nickel, le zinc... ou encore à des métaux lourds²⁷ comme le cadmium, le mercure ou le plomb, plus toxiques que les précédents. La classification en métaux lourds est souvent discutée car certains métaux toxiques ne sont pas particulièrement "lourds" (le zinc), tandis que certains éléments toxiques ne sont pas tous des métaux (l'arsenic par exemple).

De multiples activités humaines en sont responsables:

- des rejets d'usines (en forte diminution dans les pays occidentaux), par exemple de tanneries (cadmium, chrome), d'unités de fabrication de chlore (mercure) et d'usines métallurgiques,
- des épandages sur les sols agricoles de boues résiduelles de stations d'épuration,
- de l'utilisation de certains fongicides,
- des retombées des poussières atmosphériques émises lors de l'incinération de déchets ou de la combustion d'essence automobile (plomb),
- du ruissellement des eaux de pluie sur les toitures et les routes (zinc, cuivre, plomb).

La pollution métallique pose un problème particulier, car les métaux ne sont pas biodégradables et peuvent causer des dégâts considérables à la faune et la flore aquatique. En outre, certains se concentrent dans les organismes vivants tout au long de la chaîne alimentaire. Ils peuvent ainsi atteindre des taux très élevés dans certaines espèces consommées par l'homme et entraîner des risques pour la santé.

Modification des paramètres physico-chimiques de l'eau

Pollution thermique :

Ce type de pollution est lié à l'utilisation de l'eau comme liquide de refroidissement par les industriels. L'eau est notamment utilisée comme refroidisseur dans les centrales thermiques et nucléaires. Elle est pompée dans les cours d'eau ou le milieu marin côtier, auquel elle est ensuite restituée au sortir de la centrale à une température plus élevée de 4 à 5°Celsius. Elle réchauffe à leur tour les eaux dans lesquelles elle est déversée, ce qui peut perturber la vie aquatique, animale ou végétale, notamment en modifiant les rythmes physiologiques des espèces (reproduction, survie hivernale, etc) et augmenter la toxicité de certains éléments pour les poissons.

Pollution acide :

Les "**pluies acides**" résultent essentiellement de la pollution de l'air par des gaz (dioxyde de soufre et oxydes d'azote) et des particules, issus de différentes activités industrielles, de la combustion de produits fossiles riches en soufre, de la circulation automobile et de l'élevage industriel. Ces gaz (Dioxyde de soufre - SO₂ ; Oxyde d'azote – NO_x ; Ammoniac - NH₃ ; Chlorure d'hydrogène – HCl ; Fluorure d'hydrogène - HF) se dissolvent dans la vapeur d'eau de l'atmosphère et sont oxydés en acides (notamment sulfurique et nitrique) qui acidifient les précipitations. Par ruissellement et infiltration, ces pluies acides finissent par acidifier les nappes et les cours d'eau. Un apport acide trop important va entraîner une baisse rapide du pH. A un pH inférieur à 5, l'acidification des eaux met en solution des sels d'aluminium contenus dans des silicates, comme les argiles, et dont la solubilité croît rapidement avec l'acidité du milieu (pour un pH > à 6, l'Al n'est pas soluble dans l'eau).

²⁷ Ceux caractérisés par une masse volumique supérieure à 5 grammes par cm³.

Très toxiques, ces sels perturbent la photosynthèse des végétaux et la biologie des organismes aquatiques. D'autres métaux toxiques, comme le cadmium et le plomb, jusque-là bloqués dans les sédiments, sont également libérés. Si l'acidité augmente encore (pH inférieur à 4), les vertébrés et la plupart des invertébrés et des micro-organismes sont détruits. Seules quelques algues et quelques bactéries survivent.

Turbidité :

Une modification de la **turbidité** (ex. lavage de matériaux de sablière ou de carrière) et de la **salinité** de l'eau (ex. eaux d'exhaure des mines de sel) peuvent également avoir des conséquences pour la faune et la flore aquatique.

Les déchets solides

Cette pollution provient des débris solides qui s'accumulent le long des cours d'eau ou du littoral : bouteilles, sacs et autres récipients en matière plastique, bois, débris de filets et de filins... Ces déchets proviennent de décharges, autorisées ou non, des réseaux d'eau pluviale, des rejets directs d'émissaires sans dégrillage, de l'abandon de débris sur la plage par les baigneurs et les campeurs peu scrupuleux, du déversement à partir de navires (commerce et plaisance)... Ces objets constituent surtout une **nuisance visuelle** qui déprécie l'attrait d'une plage. Flottant au large, ils peuvent constituer une entrave à la pêche et à la navigation.

Les épaves de navires qui s'accumulent sur certaines côtes (comme les côtes de l'ex Sahara espagnol) et à proximité des ports peuvent être l'origine de pollution par des hydrocarbures, mais d'autre part elles constituent souvent un excellent support pour la fixation d'organismes. En haute mer, les déchets les plus fréquents sont les matières plastiques (plus de 50 %). Ces matières sont fragmentées en grains (« plastic pellets » ou « nibs ») qui se retrouvent sur toutes les plages du monde. Les produits de dégradation des matières plastiques (phtalates) se retrouvent également en grande quantité dans le sable des plages et dans l'eau. Les débris de verre et les mégots de cigarettes constituent un autre stock important.

Ces débris sont dangereux pour la vie marine. Les filets perdus et leur débris continuent à prendre des poissons et des oiseaux. Les plastiques sont ingérés comme proie par les poissons, les tortues marines, les oiseaux de mer. Les désagréments sont aussi pour les pêcheurs dont les filets récoltent des débris indésirables. Un cas plus dangereux est représenté par le stockage sur le fond de déchets toxiques indésirables : gaz de combat des dernières guerres, déchets radio-actifs... Ces substances sont enfermées dans des conteneurs métalliques ou en béton qui finalement présentent des fuites et relâchent leur contenu. Entre 1967 et 1982, 94 604 tonnes de déchets nucléaires français ont été immergées en mer. L'immersion a été arrêtée en 1983.

La pollution radio-active reste un problème toujours d'actualité. Les centrales nucléaires et les applications militaires produisent une grande quantité de déchets solides irradiés²⁸. S'ajoutent à cela quelques sous-marins nucléaires coulés à proximité des côtes qui relargueront un jour leur combustible sous l'effet de la corrosion. La pollution radioactive a un effet direct sur les peuplements aquatiques en raison de la toxicité propre de ses éléments et des propriétés cancérigènes et mutagènes de ses rayonnements. L'homme peut subir ces irradiations en ingérant des organismes contaminés qui ont concentré des isotopes radio-actifs.

²⁸ le stockage (en surface pour les déchets à vie courte et faiblement irradiés, en profondeur pour les déchets à vie longue et fortement irradiés) peut constituer une solution envisageable mais fait encore l'objet de recherches poussées.

C Interaction avec d'autres types de pollution

Santé humaine : effets toxiques des nitrates dans l'eau, hydrocarbures lors des opérations de nettoyage, isotopes radio-actifs, polluants bioaccumulables dans la chaîne alimentaire (ex : PCB, dioxines, métaux lourds,...).

Utilisation des ressources naturelles : diminution de l'accessibilité à l'eau potable à cause de la pollution des nappes souterraines par les nitrates, les pesticides et les métaux lourds.

II.2.2. VECTEUR DE TRANSMISSION – AIR

La liste des polluants atmosphériques est longue. Aux classiques habituels mais toujours réels polluants tels que les poussières, le SO₂, les NO_x, le CO, les métaux lourds, les composés organiques volatils, le fluor, l'acide chlorhydrique, etc... sont venus s'ajouter progressivement d'autres substances telles que les gaz à effet de serre et l'ozone, les organochlorés (dioxines et furannes), les HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques), etc.

Bien entendu les sources émettrices de polluants dans l'atmosphère sont fort nombreuses et concernent tous les secteurs relatifs aux activités humaines (domestique, industrie, agriculture, transports, etc.) ainsi que la nature.

En dehors des effets sur (1) les changements climatiques et (2) la santé humaine, l'augmentation de l'effet de serre, la destruction de la couche d'ozone et le smog photochimique vont avoir des effets sur la biodiversité :

Les changements climatiques dus à l'**augmentation de l'effet de serre** vont entraîner le déplacement ou la disparition de nombreuses espèces suite à la modification des conditions de vie (T° de l'air, précipitations, T° de l'eau,...).

Les fortes concentration d'ozone troposphérique (**smog photochimique**) peuvent altérer les mécanismes de photosynthèse et de respiration des plantes en provoquant des lésions dans les tissus des feuilles. En particulier, il est possible d'observer une diminution dans la productivité de certaines variétés d'espèces cultivées (exemple : haricot vert, tomate, pomme de terre, maïs, blé, épinette rouge, érable à sucre et bouleau blanc,...).

Une plus grande exposition des plantes aux ultraviolets suite à la **destruction de la couche d'ozone** peut entraîner le ralentissement de la croissance du phytoplanctons océaniques (à la base de la chaîne alimentaire) ou des rendements de certaines espèces comme le riz, le maïs,...

La pollution atmosphérique crée de l'acidité qui retombe au niveau du sol sous la forme de pluies, de neige, de brouillard ou de particules. **Cette acidité attaque les pierres et les parties métalliques des bâtiments** qui avaient jusqu'alors résisté à l'usure des siècles. Les monuments sont plus ou moins touchés en fonction de leur localisation et du type de roche qui a servi à faire les pierres de construction.

Les végétaux sont également sensibles à la pollution atmosphérique. Les "pluies acides " ont un **effet direct sur le feuillage**. Elles sont d'autant plus néfastes que l'acidité et les teneurs en ions y sont concentrées au cours de l'évaporation de la pellicule d'eau qui est déposée sur les feuilles. Sous l'action de tels polluants, la perméabilité de la cuticule des feuilles et des aiguilles serait modifiée, favorisant ainsi le lessivage des minéraux.

II.2.3. VECTEUR DE TRANSMISSION – SOL

A Types de pollution et effets potentiels

Longtemps considérés comme ayant une capacité d'absorption illimitée, les sols ont de plus en plus de difficultés à répondre aux fonctions multiples et vitales qui sont les leurs : production de biomasse agricole et forestière, milieu de vie, régulateur de l'écosystème.

Il faut distinguer quatre types de menaces pour les sols :

- Le changement d'affectation des sols : qui peut entraîner une altération du paysage et la rareté des biens (cf. utilisation des ressources naturelles)
- L'accumulation de polluants toxiques qui sont transmis aux plantes et passent dans la chaîne alimentaire
- L'acidification des sols qui diminuent leur teneur en cations nutritifs
- Les problèmes d'érosion

Changement d'affectation des sols

Le développement économique nécessite de l'espace, que ce soit pour des activités industrielles (zones industrielles, infrastructures), de logement (lotissement, urbanisation, tourisme) ou l'agriculture (défrichage, déforestation). Certaines affectations rendent impossible (à moyen ou long terme) l'utilisation du sol pour d'autres fonctions. C'est le cas notamment des anciens sites industriels désaffectés qui nécessitent une dépollution préalable avant d'être utilisés pour l'agriculture ou le logement par exemple.

Ces changements d'affectation des sols vont avoir des conséquences sur :

- La qualité de vie : modifications des paysages et perte de patrimoine naturel
- La biodiversité : réduction des zones d'habitat ou destruction d'écosystèmes

Accumulation de polluants toxiques

Les grandes sources de pollution des sols sont les rejets d'activités industrielles, l'enfouissement de déchets, et les déversements ou infiltrations accidentelles. Les principaux polluants sont les métaux lourds, les POP (en particulier certains pesticides) et les hydrocarbures. Toutes ces substances, en venant modifier les propriétés physiques, chimiques, biologiques des sols, affectent, de façon variable selon les sols, leur fertilité ainsi que leur rôle de régulateur des cycles écologiques, et constituent un danger pour la santé publique en contaminant les végétaux et les eaux.

Certaines substances, rémanentes, ont tendance à s'accumuler le long des chaînes alimentaires. Leurs effets toxiques, y compris à faibles doses, peuvent alors conduire à une détérioration de la vie biologique des sols (entraînant à son tour une baisse de la fertilité et une altération des cycles bio géochimiques) et des effets sur la santé humaine lorsque les espèces végétales ou animales contaminées sont consommées par l'homme.

Acidification des sols

Le niveau d'acidité d'un sol est caractérisé par trois paramètres : le pH, le taux de saturation et la capacité à neutraliser les acides :

- ✓ Le pH d'un sol mesure le caractère "acide" de celui-ci.
- ✓ La capacité à neutraliser les acides d'un sol définit sa résistance vis à vis des acides. Elle provient essentiellement de la composition chimique des roches dont le sol est issu : la dissolution de roches riches en éléments nutritifs neutralise l'acidité et libère ces éléments nutritifs qui deviennent disponibles pour les plantes. A l'inverse, la dissolution de roches pauvres en éléments nutritifs ne neutralise que partiellement l'acidité et libère surtout de l'aluminium. Les sols sur roche pauvre ont une faible capacité à neutraliser les acides et sont naturellement acides et pauvres en éléments nutritifs.
- ✓ Le taux de saturation (TS) d'un sol correspond à la proportion d'éléments nutritifs disponibles dans le sol. Parmi les éléments disponibles, on distingue : les cations nutritifs (les éléments nécessaires à la nutrition des organismes vivants comme le calcium, le magnésium ou le potassium et les cations acides (les éléments acides comme le proton ou l'aluminium).

Le taux de saturation et le pH d'un sol sont liés : plus le sol est acide (faible pH) et plus la proportion de cations nutritifs "échangeables" est faible.

L'homme favorise l'acidification des sols de trois manières :

- En émettant des **polluants soufrés (SO₂) et azotés (NO_x)** qui se transforment dans l'atmosphère en acides sulfurique et nitrique. Ces acides peuvent être transportés par les vents sur des centaines (voire des milliers) de kilomètres avant de retomber sous forme de "dépôts acides".
- En émettant de l'**ammoniac** dans l'air lors de l'épandage de lisiers des animaux d'élevage et d'engrais. L'ammoniac n'est pas un acide mais va se transformer dans les sols en un acide fort (l'acide nitrique).

En **exploitant de manière intensive les forêts** et en exportant certains produits contenant des éléments nutritifs. Ces pertes d'éléments nutritifs peuvent diminuer le taux de saturation du sol²⁹ et contribuer à acidifier le sol si elles dépassent les apports d'éléments nutritifs provenant de l'atmosphère et de l'altération des minéraux du sol

NB : l'acidification des sols va entraîner, in fine, l'acidification des cours d'eau avec les conséquences pour la faune, la flore et la santé humaine.

L'érosion

L'érosion du sol est une forme de dégradation au même titre que la compaction, la réduction des taux en matière organique, la détérioration de la structure du sol, le drainage souterrain insuffisant, la salinisation et l'acidification du sol. Toutes ces formes de dégradation, sérieuses en elles-mêmes, accélèrent l'érosion du sol. L'érosion est un phénomène naturel sous l'action de l'eau et du vent, chacun provoquant une perte importante de sol chaque année.

²⁹ Proportion des cations nutritifs par rapport à l'ensemble des cations échangeables dans un sol.

Ce phénomène peut être aggravé par l'activité humaine suite à :

- la déforestation : les racines des arbres permettent de retenir les terres et le feuillage protège le sol des effets du vent et des fortes pluies,
- de mauvaises pratiques culturales : ceci comprend la profondeur, la direction et la période de labour ainsi que le maintien d'un couvert végétal
- l'imperméabilisation des sols dû à l'urbanisation qui favorise le ruissellement.

L'érosion est responsable de l'appauvrissement des sols en enlevant la matière organique, en affaiblissant sa structure et en diminuant sa capacité de rétention de l'eau et de cations nutritifs, réduisant par là sa productivité agricole. A ces effets directs s'ajoutent l'envasement des barrages et des canalisations, la modification du régime des eaux, l'accroissement des risques d'inondations.

B Interactions avec d'autres types de pollution

Effet sur la santé humaine

Les polluants présents dans le sol peuvent migrer vers les espèces végétales et animales et s'accumuler tout au long de la chaîne alimentaire (dioxines, métaux lourds³⁰,...) jusqu'à provoquer des problèmes de santé pour l'homme.

Effet sur l'utilisation des ressources naturelles

En raison du développement économique et de l'accroissement de la population, le sol est une ressource naturelle de plus en plus précieuse qu'il convient de protéger. L'utilisation intensive ou la contamination d'un sol peut en effet le rendre inapte au développement de certaines activités (agriculture, logement, espaces verts,...).

II.2.4. SYNTHÈSE

Les tableaux ci-dessous reprennent les caractéristiques des enjeux environnementaux associés au thème : "Nature et Biodiversité" en fonction du milieu récepteur : eau, air et sol.

³⁰ Principalement le Plomb et le Mercure sous la forme méthylée.

Tableau 2 : Caractéristiques des enjeux environnementaux associés au thème : "Nature & Biodiversité - Eau"

Description des enjeux environnementaux		Caractéristiques des enjeux environnementaux		
Flux élémentaires	Type de pollution	Domaine d'application	Persistance de l'effet	Etat des connaissances scientifiques
Matière organique en suspension	Excès de matière organique	L	R	Elevé
Hydrocarbures	Pollution par les hydrocarbures	L	R	Elevé
Germes pathogènes, bactéries, virus	Pollution microbiologique	L	R	Elevé
Insecticides, raticides, Fongicides, herbicides	Augmentation de la teneur en pesticides	L	R ou RI	Moyen
Nitrates et phosphates	Eutrophisation	L	R	Elevé
Apport calorique ou de sel	Modification de la t° ou de la salinité	L	R	Elevé
Gaz dissouts dans l'eau : SO ₂ , NO _x , NH ₃ , HCl, HF	Acidification	LG	R ou RI	Elevé
Métaux lourds : Cd, Hg, Pb, Cr,... Autres métaux : Al, As, Co, Cu, Zn, Ni,...	Pollution métallique	L	R	Moyen
Nitrates	Augmentation de la teneur en nitrate dans les eaux souterraine	LG	R	Elevé
Plastiques, bois Déchets radio-actifs Epaves Débris de filets	Déchets solides le long des cours d'eau ou du littoral	LG	R ou RI	Elevé

Tableau 3 : Caractéristiques des enjeux environnementaux associés au thème : "Nature & Biodiversité - Air"

Description des enjeux environnementaux		Caractéristiques des enjeux environnementaux		
Flux élémentaires	Type de pollution	Domaine d'application	Persistance de l'effet	Etat des connaissances scientifiques
Production d'O₃ au niveau du sol : Interactions entre COVNM + NO ₂ + UV	Smog photochimique	LG	R	Elevé
Halocarbure : CFC et autres aérosols chlorés Hydrogène	Destruction de la couche d'ozone	G	RI ou I	Moyen Faible concernant l'H2
GES directs : CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFC, CF, SF, HFE, HG, O ₃ GES indirects : CO, NOx	Augmentation de l'effet de serre	G	I	Moyen
Gaz dissouts dans l'eau : SO ₂ , NOx, NH ₃ , HCl, HF	Acidification de l'air	LG	R ou RI	Elevé

Tableau 4 : Caractéristiques des enjeux environnementaux associés au thème : "Nature & Biodiversité - Sol"

Description des enjeux environnementaux		Caractéristiques des enjeux environnementaux		
Flux élémentaires	Type de pollution	Domaine d'application	Persistance de l'effet	Etat des connaissances scientifiques
Intensification de l'agriculture Changement d'affectation	Utilisation de l'espace	LG	R ou RI	Elevé
Pluies acides SO ₂ , NOx, HCl, HF Ammoniac Transformation en acide nitrique dans les sols Exploitation intensive des forêts Diminution du taux de saturation	Acidification des sols	LG	R ou RI	Elevé
Métaux lourds Hg, Pb, Cr, Cd,... Pesticides Herbicides, fongicides,... Hydrocarbures HAP, BTEX, Huiles...	Ecotoxicité	LG	R ou RI	Moyen
Déforestation Mauvaises pratiques culturales Imperméabilisation des sols	Erosion	L ou LG	R ou RI	Elevé

Les cartes de perception des enjeux environnementaux associés au thème "Nature & Biodiversité" sont reprises ci-dessous.

Figure 4 : Carte de perception des enjeux environnementaux associés au thème " Nature & Biodiversité - EAU"

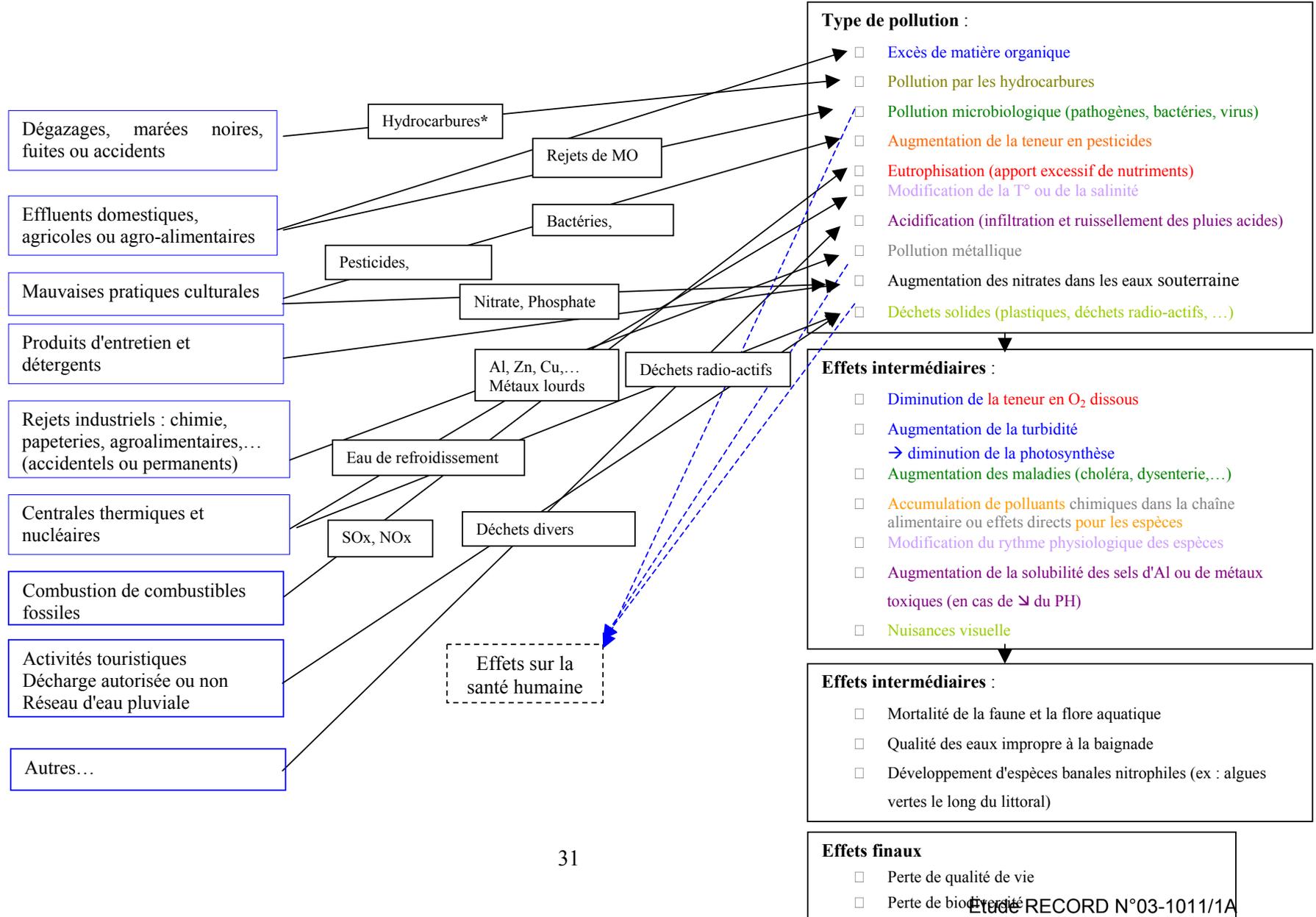


Figure 5 : Carte de perception des enjeux environnementaux associés au thème " Nature & Biodiversité - AIR"

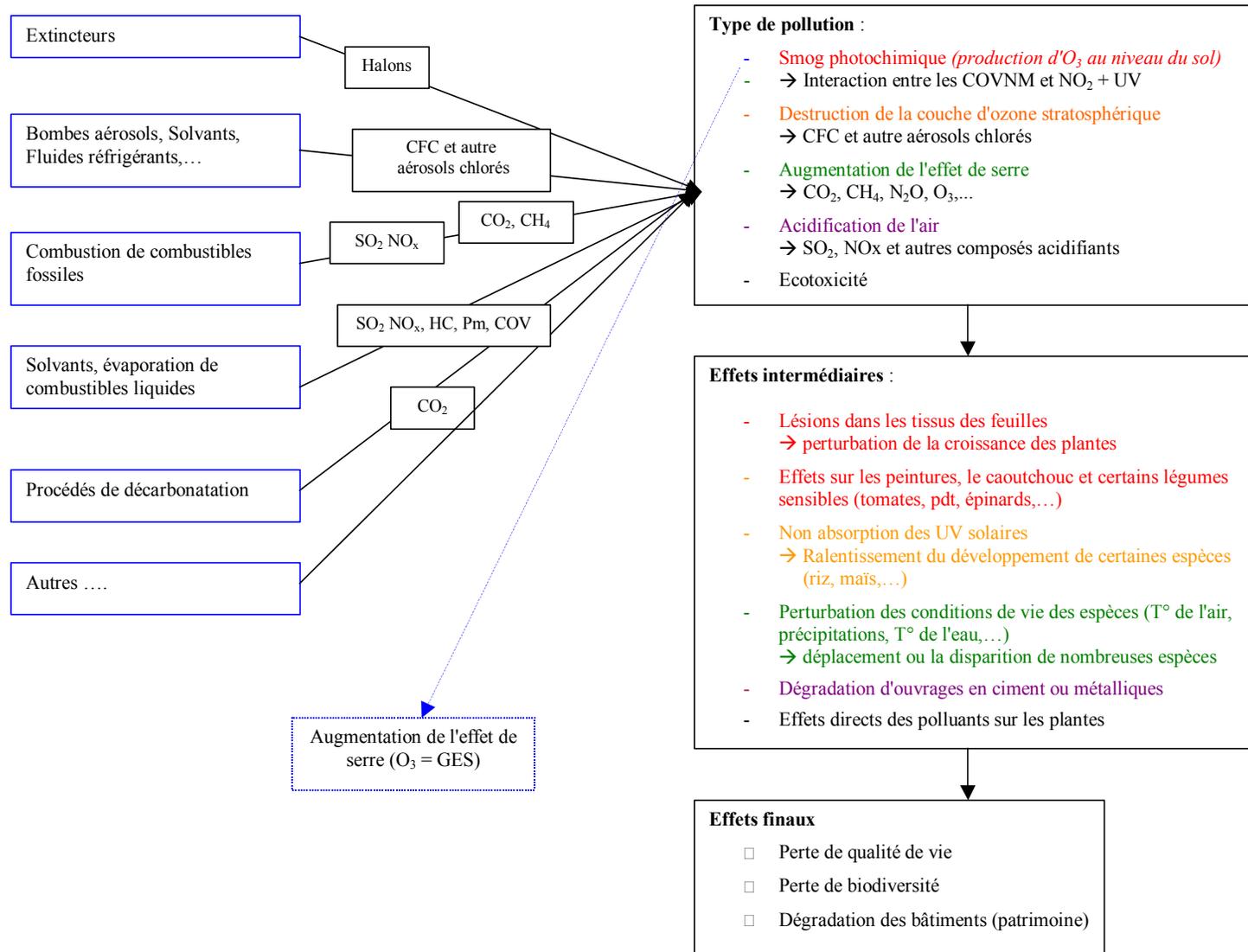
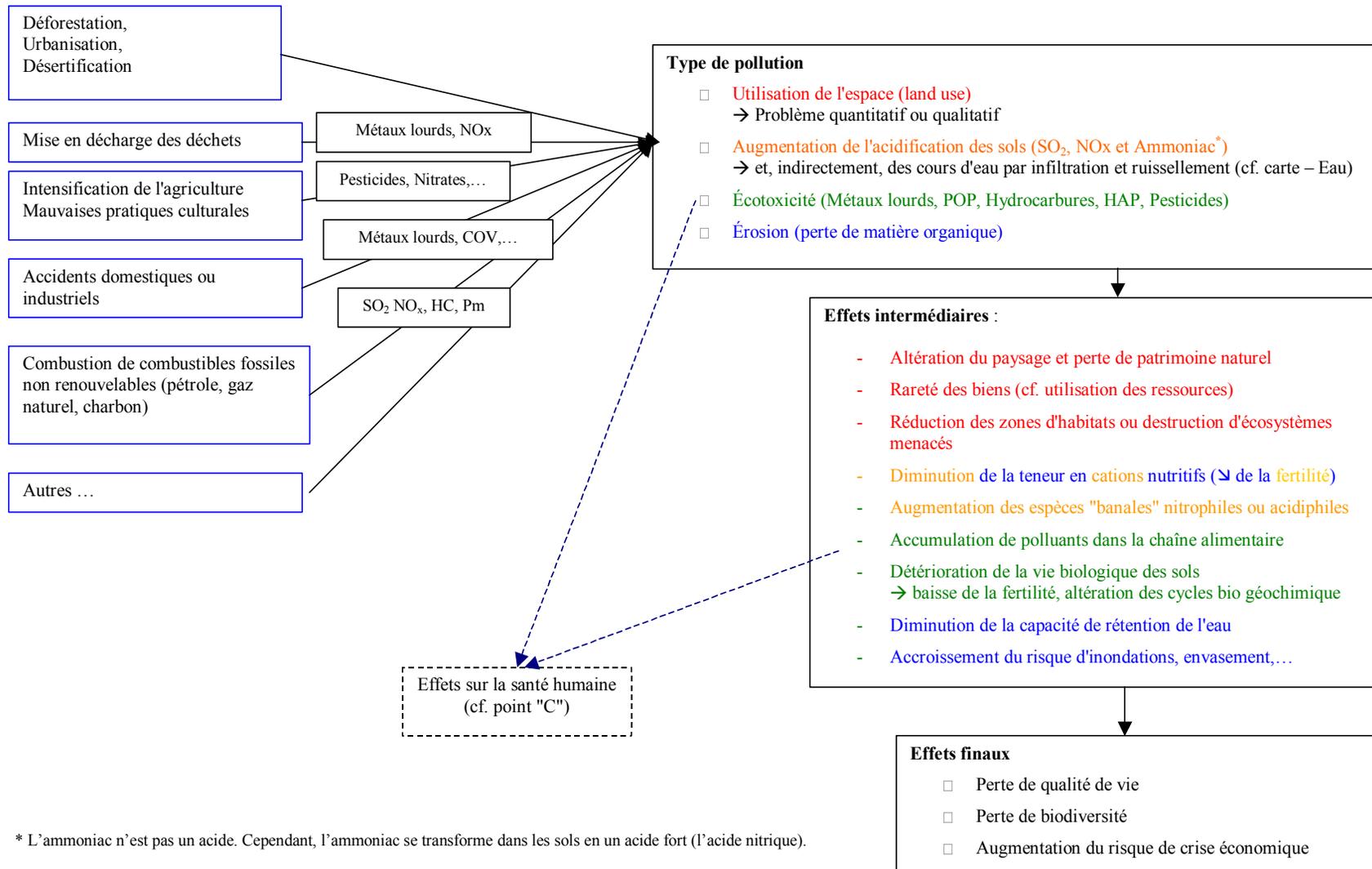


Figure 6 : Carte de perception des enjeux environnementaux associés au thème " Nature & Biodiversité - SOL "



* L'ammoniac n'est pas un acide. Cependant, l'ammoniac se transforme dans les sols en un acide fort (l'acide nitrique).

II.3. EFFETS SUR LA SANTÉ HUMAINE

Il apparaît de plus en plus largement, et indéniablement, que la santé humaine est affectée par les problèmes écologiques liés à la pollution atmosphérique et aquatique, aux substances chimiques dangereuses et aux nuisances sonores. L'aspect santé est particulier dans la mesure où il s'agit souvent d'un effet final ayant des sources multiples. L'effet sur la santé humaine peut être dû à une exposition ponctuelle à des polluants toxiques ou résulter d'effets intermédiaires comme la non absorption des U.V. solaires due à la destruction de la couche d'ozone stratosphérique, elle même causée par l'émission d'halocarbures.

Les effets les plus connus sont les problèmes d'affection des voies respiratoires, d'allergies (en particulier d'asthme), certains types de cancer, des effets neurotoxiques et la déficience du système immunitaire. Nous sommes également confrontés à un problème croissant de nuisances sonores. En outre, les effets de petites quantités de polluants qui s'accumulent dans nos organismes, ainsi que la manière dont différents contaminants interagissent les uns avec les autres dans nos organismes sont encore peu connus et font l'objet de recherches.

On peut considérer différentes catégories de risques pour la santé humaine :

- Toxicité humaine par polluant : inhalation, ingestion ou contact direct de substances toxiques pour l'homme.
- Smog photochimique (brouillard jaune/noir au dessus des villes) : production excessive d'ozone troposphérique et accumulation de particules en suspension.
- Destruction de la couche d'ozone : exposition accrue aux ultraviolets solaires.
- Exposition au bruit et aux odeurs.

II.3.1. TOXICITÉ HUMAINE PAR POLLUANTS

Le lien entre les effets néfastes sur la santé humaine et leurs origines (exposition à une substance chimique particulière), peut être obtenu à partir d'études épidémiologiques, mais chaque cas est spécifique et tous n'ont pas encore été étudiés. On estime qu'environ 30.000 substances chimiques artificielles sont commercialisées en quantité supérieure à 1 tonnes/an et, pour la grande majorité d'entre elles, nous n'avons qu'une connaissance très limitée des risques qu'elles présentent pour la santé des personnes et pour l'environnement. Parmi ces substances, environ 140 ont été recensées en tant que substances prioritaires et doivent faire l'objet d'une évaluation exhaustive des risques par les autorités des États membres. Le site de la CE reprend une liste de 50 substances dangereuses : http://www.eper.cec.eu.int/eper/pollutant_info.asp. Les effets toxiques d'autres substances sont également disponibles auprès de l'Institut National de Recherche et Sécurité (INRS – www.inrs.fr).

Le tableau ci-dessous reprend les pathologies observées en fonction des **polluants émis dans l'air dont les effets sont les plus connus**.

" Typologie des enjeux environnementaux et usage des différentes méthodes d'évaluation environnementale,
notamment dans le domaine des déchets et des installations industrielles "
Rapport final - juin 2005

Principaux polluants dans l'air - sources	Autres conséquences	Effets sur la santé
<p>Oxydes d'azote (NOx) Le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO²) sont principalement produits par les transports et les centrales thermiques</p>	Formation d'ozone troposphérique et contribution au phénomène des pluies acides.	Puissant irritant des voies respiratoires en s'infiltrant jusque dans les alvéoles. Au niveau des bronches, il favorise les infections bactériennes chez les enfants et une hyperactivité chez les asthmatiques.
<p>Dioxyde de soufre (SO₂) Provient de la combustion du fuel, charbon et diesel</p>	Contribue au phénomène des pluies acides.	Irritant avec effets bronchoconstricteurs et essoufflement chez les asthmatiques. Toux et gêne respiratoire chez l'adulte. Altération des fonctions respiratoires chez l'enfant.
<p>Monoxyde de carbone (CO) Produit par les moteurs à essence et l'ensemble des procédés de combustion</p>	Formation d'ozone troposphérique	Liaison irréversible sur l'hémoglobine. Baisse de l'oxygénation.
<p>Particules en suspension (Ps) Produits de combustion industrielle, chauffage et incinération de déchets. Les particules les plus fines sont émises par les moteurs diesel</p>	Salissure des surfaces pour les plus grosses et transport de composés toxiques (sulfates, métaux lourds, hydrocarbures) par les plus fines.	Très dangereuses même à de faibles concentrations. Altération de la fonction respiratoire chez l'enfant. Propriétés cancérogènes pour les composés émis par les moteurs diesel.
<p>Ozone (O₃) Produit dans la basse atmosphère par interaction entre les ultraviolets et les gaz tels que CO, SO₂, NOx, COV et hydrocarbures</p>	Forte dégradation de la qualité de l'air, pluies acides et effet de serre.	Atteint facilement les alvéoles pulmonaires, ce qui entraîne toux et altération pulmonaire surtout chez l'enfant et l'asthmatique. Effets aggravés par l'exercice physique.
<p>Composés organiques volatils (COV) Proviennent des hydrocarbures (benzène, 1-3butadiène) émis dans les gaz d'échappement et des solvants</p>	Formation d'ozone troposphérique	Irritants pour les yeux, gorge, nez, poumons. Capacité respiratoire diminuée. Risques d'effets cancérogènes.
<p>Plomb (Pb)</p>		Modifie la composition du sang en gênant la fabrication de l'hémoglobine Effet neurotoxique très important (saturnisme)

Une grande partie des produits chimiques (exemple : le benzo(a)pyrène, les phénols polychlorés, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les métaux lourds (mercure, cadmium, plomb,...) **qui pénètrent dans l'eau**, même en quantité minime, sont également toxiques pour l'être humain.

A côté de ces polluants, pour lesquels les effets sur la santé sont le mieux connus, le groupe des pesticides exige une attention particulière (du point de vue de la perception du public et des décideurs sans être effectivement majeur). Les pesticides sont des substances chimiques de synthèse principalement utilisées par l'agriculture pour détruire les êtres nuisibles pour les cultures. Environ 350 produits différents (herbicide, insecticide, fongicide, nématicide, ...) sont connus pour être utilisés dans la Communauté Européenne aujourd'hui. Mal utilisés (en terme de quantités) et en raison de leur faible pouvoir de dégradation, les pesticides peuvent s'accumuler dans la chaîne alimentaire et/ou contaminer les milieux naturels, c'est la bio-accumulation. Les pesticides organiques sont en général classés en trois grands groupes : Organochloré, Organophosphoré et Carbamate et il y a de multiples familles.

Les lacunes dans les données actuelles sur la question permettent difficilement de préciser l'ampleur et les tendances du problème, mais les éléments de preuve sont suffisants pour suggérer que le problème est important. La contamination des eaux souterraines est particulièrement préoccupante. En moyenne, 65% de l'eau potable européenne est fournie à partir des eaux souterraines et, même après l'adoption de mesures correctives pour empêcher davantage de contamination, les eaux souterraines ont souvent besoin de beaucoup de temps pour retrouver des niveaux de qualité acceptables. La contamination de nos denrées alimentaires est également source d'inquiétude, tout comme les preuves de l'accumulation continue de certains pesticides dans les plantes et animaux, avec ses répercussions sur leur santé et sur leur capacité de se reproduire.

Un autre groupe de polluants est particulièrement suivi par les autorités publiques et les riverains ; il s'agit des **émissions de radioéléments dans l'air et l'eau** (C14, H3, Kr85 ...). La radioactivité est un phénomène naturel. Elle existe depuis l'origine des temps. L'homme a donc toujours vécu dans une atmosphère radioactive. Cinquante et un éléments chimiques, présents dans le milieu, sont naturellement radioactifs. Outre ces éléments, la radioactivité naturelle provient, en grande partie, de la présence d'un gaz radioactif, le radon. Depuis les années quarante, aux éléments radioactifs naturels, il convient d'adjoindre les 1 500 éléments artificiellement créés. Ces éléments sont, pour la plupart, le fait de travaux et d'essais militaires, de l'industrie nucléaire et des activités nucléaires diffuses regroupées sous le vocable « nucléaire diffus ». Le développement de l'utilisation de ces éléments radioactifs a produit des déchets radioactifs qu'il convient de surveiller afin de préserver l'environnement. Une autre application du nucléaire, qui a provoqué une perception de peur chez les populations, est la filière de production d'énergie électrique d'origine nucléaire (la "centrale nucléaire") ainsi que la recherche qui l'accompagne. Les accidents majeurs de l'industrie nucléaire sont au nombre de quatre : Windscale en Grande-Bretagne (1957), Three Miles Islands aux USA (1979), Tchernobyl en Ukraine (1986) et Tokaï au Japon (1999).

Les radiations auxquelles sont exposés les êtres vivants provoquent des effets variés et pour certains irréversibles. En effet, toute radiation ionisante interagit sur tout tissu vivant, mais la gravité des effets dépend du type de radiations, de la dose absorbée, du taux d'absorption et de la radiosensibilité des tissus concernés. Les effets biologiques varient selon l'intensité et la nature du rayonnement et selon la durée d'exposition.

Ils sont classés en :

- effets précoces et "déterministes" dus à de très fortes doses de radiations. Ils entraînent des effets biologiques pouvant provoquer, dans les quelques heures à quelques jours qui suivent l'exposition, la mort de toute vie ou une déplétion cellulaire qui n'entraîne pas toujours la mort de l'organisme,
- effets différés dits "stochastiques"³¹ qui entraînent des mutations de l'ADN. Ces effets peuvent se manifester tardivement (plus de 10 ans après l'exposition),
- effets génétiques, également "stochastiques", qui concernent la descendance des sujets irradiés,
- effets portant atteinte à l'embryon ou au fœtus.

L'impact des rejets d'effluents radioactifs gazeux et liquides est étudié au travers d'études radioécologiques réalisées dans l'environnement immédiat de l'installation. Ces études sont composées d'un état de référence initial, de bilans décennaux, et d'études annuelles. L'impact sanitaire des rejets d'effluents radioactifs liquides et gazeux n'est pas directement mesurable. Cet impact est évalué indirectement par l'estimation de la dose efficace (en Sievert) reçue par un groupe de référence qui constitue la population locale la plus exposée. Sur la base des rejets réels effectués par les centres nucléaires de production d'électricité en exploitation et en considérant que les individus consomment des aliments produits localement ainsi que les poissons pêchés en aval du point de rejet, chaque habitant adulte reçoit une dose efficace annuelle inférieure à 1 e-3 mSv. Pour mémoire, la limite de dose ajoutée résultant des activités humaines est fixée à 1 mSv par an par le décret n°2002-460 du 4 avril 2002. Il est à noter de plus que cette dose additionnelle est à comparer à l'exposition à la radioactivité naturelle omniprésente, qui est en moyenne en France de 2,4 mSv/an, et dont les fluctuations d'une région à l'autre peuvent faire varier cette valeur du simple au double.

II.3.2. SMOG

A Causes principales

Il faut distinguer le smog photochimique (ou smog d'été) du smog d'hiver :

Le smog photochimique est un mélange de polluants atmosphériques nocifs (en particulier les particules en suspension et l'ozone) créé quand des polluants primaires (NOx et COV) interagissent sous l'influence du soleil. Les polluants atmosphériques primaires venant principalement de la combustion de combustibles fossiles, le smog photochimique est surtout un phénomène observé en zones urbaines denses (brume d'un jaune brunâtre ou d'un gris blanchâtre observé en été au-dessus des grands centres urbains).

Le smog d'hiver ou smog acide est caractéristique de conditions hivernales avec formation de brouillards. Il est généralement lié à la présence d'une inversion de température, empêchant les polluants (SO₂ et particules en suspension) de se disperser verticalement. De tels épisodes sont souvent associés à des températures basses et donc à une augmentation des émissions de SO₂ et de poussières provenant du chauffage domestique. L'humidité atmosphérique favorise la transformation du dioxyde de soufre en acide sulfurique. Associé aux poussières, le smog acide est responsable de troubles respiratoires et d'irritations oculaires.

³¹ Par opposition aux effets non-stochastiques qui représentent les effets immédiats, prévisibles et obligatoires suite à une exposition brève et intense à une source radioactive.

NB : Les épisodes de smog d'hiver sont bien moins critiques et fréquentes ces dernières années en raison de la forte baisse de la teneur en soufre des combustibles (notamment moins de charbon et désulfuration du mazout).

B Principaux polluants et effets

Les particules en suspension (smog d'été et d'hiver)

Il s'agit de poussières ou de minuscules gouttelettes assez petites pour demeurer en suspension dans l'air. Ce sont ces particules qui donnent au smog sa couleur brune, gris foncé ou blanche selon le type de particules. Les petites particules, celles de moins de 10 micromètres, sont très nuisibles à la santé humaine, en particulier pour les personnes qui ont déjà des maladies cardiaques ou pulmonaires. Les particules très fines, celles de moins de 2,5 micromètres, sont particulièrement inquiétantes, car elles peuvent pénétrer profondément dans les poumons et sont très difficilement mesurables. Elles peuvent aussi demeurer en suspension dans l'air durant des jours, voire des semaines et se répandre sur de longues distances. Ces particules font l'objet d'une attention de plus en plus soutenue de la part des riverains d'installations industrielles (exemple : les cimenteries) qui, en l'absence d'études approfondies sur le sujet, exigent qu'on applique le principe de précaution.

L'ozone troposphérique (smog d'été)

L'ozone est un gaz incolore, très irritant, qui se forme lorsque deux groupes de polluants communs, les oxydes d'azote (NOx) et les composés organiques volatils (COV), réagissent les uns avec les autres sous l'action du rayonnement solaire. Contrairement à l'ozone qui se forme naturellement dans la stratosphère, l'ozone troposphérique ne protège pas des rayons UV nocifs du soleil; en outre, il ne se déplace pas jusque dans la haute atmosphère et ne participe donc pas à la résorption du "trou de la couche d'ozone" .

En été, lors de fortes chaleurs avec vent faible, des périodes de fortes concentrations durent plusieurs jours et se produisent lorsqu'une masse d'air stagnante emprisonne les polluants au-dessus d'une région.

Les risques pour la santé sont des problèmes d'irritation des yeux et des voies respiratoires.

Le dioxyde de soufre (smog d'hiver)

La principale source d'émission de dioxyde de soufre est la combustion de combustibles fossiles dans les centrales électriques, les véhicules, le chauffage domestique, les raffineries et autres grandes industries. Les volcans et les feux de forêt rejettent également une quantité importante de SO₂. De 1970 à 1998 la quantité de dioxyde de soufre rejetée chaque année dans l'atmosphère a été réduite de 75%. Cette réduction est principalement due à l'usage décroissant de charbon dans les centrales électriques et son remplacement par le gaz naturel.

Une exposition excessive au SO₂ peut causer des effets sur l'œil, les poumons et la gorge (bronchites et troubles respiratoires).

C Interaction avec d'autres types de pollution

En plus de poser des problèmes aux humains, les particules en suspension dans l'air et l'ozone troposphérique dégradent la végétation et détériorent certaines matières naturelles et synthétiques, notamment les peintures et les teintures. En outre, l'ozone est un gaz à effet de serre puissant qui contribue aux changements climatiques.

Le dioxyde de soufre est également toxique pour certaines plantes et peut produire des signes visibles de blessure et/ou réduire les rendements de certaines récoltes. Paradoxalement, les effets salutaires peuvent aussi être observés sur quelques plantes où le dioxyde de soufre réduit la fréquence de maladies fongiques. Rappelons que le SO₂ interagit avec l'eau, la lumière solaire et les ions présents dans l'atmosphère pour former diverses particules acides (sulfates), qui sont une composante importante des pluies acides.

II.3.3. DESTRUCTION DE LA COUCHE D'OZONE STRATOSPHERIQUE

A Causes principales

Les causes et mécanismes de destruction de la couche d'ozone stratosphérique sont décrits au point II.1, p.10. En dehors des effets sur la biodiversité et les changements climatiques, l'exposition accrue aux ultraviolets (en particulier les UVB) est responsable de l'augmentation du risque de:

- Cancer de la peau
- Cataracte
- Déficience du système immunitaire

B Interaction avec d'autres types de pollution

A mesure que la couche d'ozone s'amincit et qu'une plus grande quantité d'UV atteint la surface de la terre, les réactions photochimiques qui produisent l'ozone troposphérique se produisent avec plus de vigueur et donc accentuent la problématique du smog photochimique.

II.3.4. NUISANCES SENSORIELLES

Le **bruit** est placé au premier rang des nuisances de la vie quotidienne. Les sources du bruit sont multiples et ses perceptions diffèrent selon les lieux et les personnes. La nocivité est fonction de la durée, de l'intensité, de la répétition et de l'horaire d'émission.

Le bruit agit sur le système auditif, pouvant causer la surdité totale ou partielle. Le bruit est également un agent stressant, impliqué dans l'apparition de nombreux troubles tels que vertiges, effets cardiovasculaires, nausées, fatigabilité excessive, irritabilité,...

Les problèmes du bruit touchent essentiellement les milieux urbains et reposent, pour une grande part, sur le trafic automobile et aérien. En milieu industriel, le bruit apparaît plus étroitement lié à la sécurité et à l'hygiène au travail³², dans la mesure où, sauf dans certains cas très particuliers, le bruit produit par les usines n'est généralement pas perçu à l'extérieur. Selon les évaluations, l'industrie n'intervient que pour 20 % contre 80 % pour les transports dans l'ensemble des émissions de bruit, même si l'impression générale voudrait que le pourcentage soit plus élevé. En dehors des effets sur l'homme le bruit peut également entraîner des déplacements de populations animales (principalement des oiseaux).

Comme pour le bruit, il existe une grande imprécision quant à la sensation de l'intensité de l'**odeur** et la sensibilité des individus est très variable. On a souvent du mal à distinguer ce qui relève de l'odeur et ce qui relève de la saveur (par exemple les odeurs de la campagne peuvent être perçues comme un désagrément ou rappeler des souvenirs d'enfance). Parmi les composés odorants, le plus connu est le H₂S qui dégage une odeur semblable aux oeufs pourris. Le H₂S est surtout produit par les usines de production de pâte à papier (procédé Kraft) et par les raffineries de pétrole.

³² En France, dans le milieu du travail, la surdité est la première maladie : 25% des maladies professionnelles.

Les problèmes d'odeurs sont responsables de désagréments aux riverains mais peuvent également être annonciateurs d'un risque pour la santé humaine (exemple : odeur du mercaptan ajouté au gaz naturel).

II.3.5. EFFETS CRAINTS – NUISANCES NON SENSORIELLES

Ces enjeux environnementaux font l'objet de campagnes d'information de la part des organisations de défense de l'environnement qui veulent faire appliquer le principe de précaution tant que les effets sur l'environnement n'ont pas encore été étudiés en profondeur.

A OGM

Certains OGM (organismes génétiquement modifiés) peuvent avoir un impact tant positif que négatif sur l'environnement. Les modifications introduites dans un OGM, ou les propriétés totalement nouvelles qui peuvent être conférées à un organisme grâce au génie génétique, soulèvent des questions sur les impacts potentiels pour la biodiversité (par exemple des questions sur la possibilité et les conséquences du transfert du caractère nouveau d'un OGM à une espèce sauvage proche, sur l'impact direct ou indirect sur la faune ou la flore, sur le caractère réversible de modifications éventuelles de la biodiversité, sur les bénéfices attendus pour l'environnement...).

Tout comme pour les impacts sanitaires, les risques pour l'environnement, directs ou indirects, immédiats ou différés, de chaque OGM, sont donc évalués au cas par cas, avant d'envisager la décision de son utilisation dans l'environnement, voire éventuellement de son utilisation commerciale à grande échelle, si aucun impact inacceptable n'a été identifié. La question doit être étudiée pour chaque OGM spécifique, car les impacts peuvent être très différents. A ce jour, seulement quelques espèces de plantes (principalement le soja, le maïs, le coton et le colza) et essentiellement deux caractères (résistance aux herbicides, et résistance aux insectes, ou une combinaison des deux) représentent en 2003 plus de 99% de la surface d'OGM cultivée à l'échelle commerciale dans le monde. Le retour d'expérience sur les impacts environnementaux, tant positifs que négatifs, est donc encore limité par rapport aux différents OGM qui, à l'avenir, sont susceptibles d'être utilisés à grande échelle dans l'environnement.

Signalons également que l'utilisation du génie génétique est porteur d'espoir pour réduire une partie des dommages environnementaux inhérents aux activités industrielles et humaines. L'utilisation de certains OGM, ayant les caractères appropriés, peut faciliter la diminution, en agriculture, de l'utilisation de terres arables, d'eau, de matières fertilisantes ou de produits phytosanitaires, pour une production équivalente. On peut aussi envisager d'utiliser des microorganismes génétiquement modifiés adaptés pour dépolluer les sols contaminés, traiter les eaux usées industrielles, ou plus généralement pour éliminer certains contaminants de l'environnement. Toutefois, la connaissance des impacts positifs sur l'environnement des OGM est aujourd'hui très limitée, à partir du peu de données issues des quelques OGM cultivés à grande échelle, et doit également s'envisager au cas par cas.

B Ligne à haute tension

Les lignes à haute tension transportent l'énergie électrique à des tensions comprises entre 44 et 765 kV (1 kV = 1000 V).

La question du danger des lignes haute tension pour la santé humaine fait débat depuis le début des années 80. La circulation du courant dans une ligne électrique crée autour de celle-ci des champs magnétiques à très basse fréquence. Ceux-ci peuvent créer à l'intérieur de l'organisme des champs et des courants électriques, avec d'éventuels effets biologiques et sanitaires.

Des études épidémiologiques ont montré qu'il pouvait exister une association entre une forte exposition à ces champs et la leucémie de l'enfant, mais la cause de cette association n'est pas établie. Des études de laboratoire sur l'homme et l'animal n'ont pas montré d'effets de façon reproductible.

De plus, sous une ligne à haute tension, les champs magnétiques atteignent au maximum 20 microteslas, ce qui est nettement moins que les limites d'exposition quotidienne recommandées par l'Union Européenne (100 microteslas pour le public, 500 microteslas pour les travailleurs). Mais en 2001, un rapport publié par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) a classé les champs magnétiques à très basse fréquence dans la catégorie des agents « *peut-être cancérogènes pour l'homme* »... tout en recommandant de nouvelles recherches « *pour aboutir à des informations plus concluantes* ». Face à ces incertitudes, les opposants aux lignes à haute tension demandent l'application du principe de précaution. Les lignes enterrées présentent l'avantage de créer des champs magnétiques plus faibles car les câbles sont plus rapprochés les uns des autres.

Autre enjeu : la biodiversité. Certaines zones traversées par les lignes sont riches en faune et en flore. Ainsi, dans l'aire d'étude du projet de ligne franco-espagnole, on a dénombré 176 espèces d'oiseaux, dont 53 sensibles aux lignes : elles peuvent les heurter soit pendant un vol migrateur soit pendant leurs déplacements locaux. Il existe cependant des moyens de réduire les risques dans ce domaine, notamment grâce à des spirales de couleur posées sur les câbles pour signaler leur présence aux oiseaux migrants.

C Les ondes électromagnétiques (téléphone cellulaire)

Il faut distinguer l'effet des ondes émises par le téléphone cellulaire (GSM) sur son utilisateur de celui du rayonnement des antennes-relais sur la population exposée.

Lors d'une communication de longue durée (plus de 10 minutes), on constate un échauffement (1° C) de la zone du cerveau située à proximité de l'oreille de l'utilisateur. Ce phénomène est dû à l'absorption par le cerveau du rayonnement émis par l'appareil. Certaines études tendraient à montrer que cet effet thermique peut augmenter le risque de cancer du cerveau. Cependant, ces études ont été réalisées à petite échelle et demandent confirmation. Par ailleurs, divers symptômes inquiétants ont pu être observés chez certains utilisateurs de GSM : migraines, troubles de la mémoire et de la concentration. L'Organisation Mondiale pour la Santé (OMS) a, dès lors, lancé une vaste étude épidémiologique qui pourra évaluer la nocivité ou l'innocuité de l'utilisation d'un téléphone cellulaire.

Même si l'incertitude règne dans les milieux scientifiques, le principe de précaution est souvent d'application.

La nocivité éventuelle des ondes émises par les antennes-relais sur la population riveraine est beaucoup plus difficile à évaluer. Les résultats des études scientifiques qui ont abordé le problème sont hautement contradictoires. Les normes actuelles (norme nationale : 20,6 V/m), qui fixent un niveau maximal d'intensité pour les ondes émises, tendent à réduire cet impact potentiel. La situation en hauteur des antennes va également dans ce sens, vu que les ondes diffusées à grande distance sont émises dans le plan horizontal. Les immeubles les plus exposés ne sont dès lors pas nécessairement ceux qui accueillent les antennes : les matériaux du toit du bâtiment absorbent le plus souvent la quasi-totalité du rayonnement. Par conséquent, ne seraient exposées à des ondes d'une intensité significative, que les personnes qui se trouvent dans un périmètre proche de l'antenne (rayon d'une centaine de mètres), à la hauteur de celle-ci. Des effets d'amplification du rayonnement par une structure métallique (balcons, châssis de fenêtre) sont parfois observés.

Le niveau d'exposition est beaucoup plus faible que pour les utilisateurs de téléphones cellulaires, mais les ondes sont reçues en continu. En France, un décret fixe les normes d'émissions des antennes GSM à 41 Volts par mètre (V/m) pour le réseau 900 MHz et à 58 V/m pour le 1800 MHz,

Parmi les études entreprises récemment, aucune ne permet de conclure que l'exposition à des champs de radiofréquences émis par les téléphones mobiles ou leurs stations de base ait une incidence néfaste quelconque sur la santé. Toutefois, l'état des connaissances actuelles présente des lacunes qui doivent être comblées pour permettre une meilleure évaluation des risques sanitaires. Il s'écoulera entre trois et quatre ans avant que les recherches nécessaires sur les radiofréquences soient menées à terme et évaluées et que les résultats finals soient publiés (source : OMS). Par ailleurs, le Centre international de Recherche sur le Cancer (CIRC) -- institution de l'OMS spécialisée dans la recherche sur le cancer -- coordonne actuellement une vaste étude épidémiologique dans plus d'une dizaine de pays afin de déterminer l'existence de liens éventuels entre l'utilisation des téléphones mobiles et les cancers au niveau de la tête et du cou.

II.3.6. SYNTHÈSE

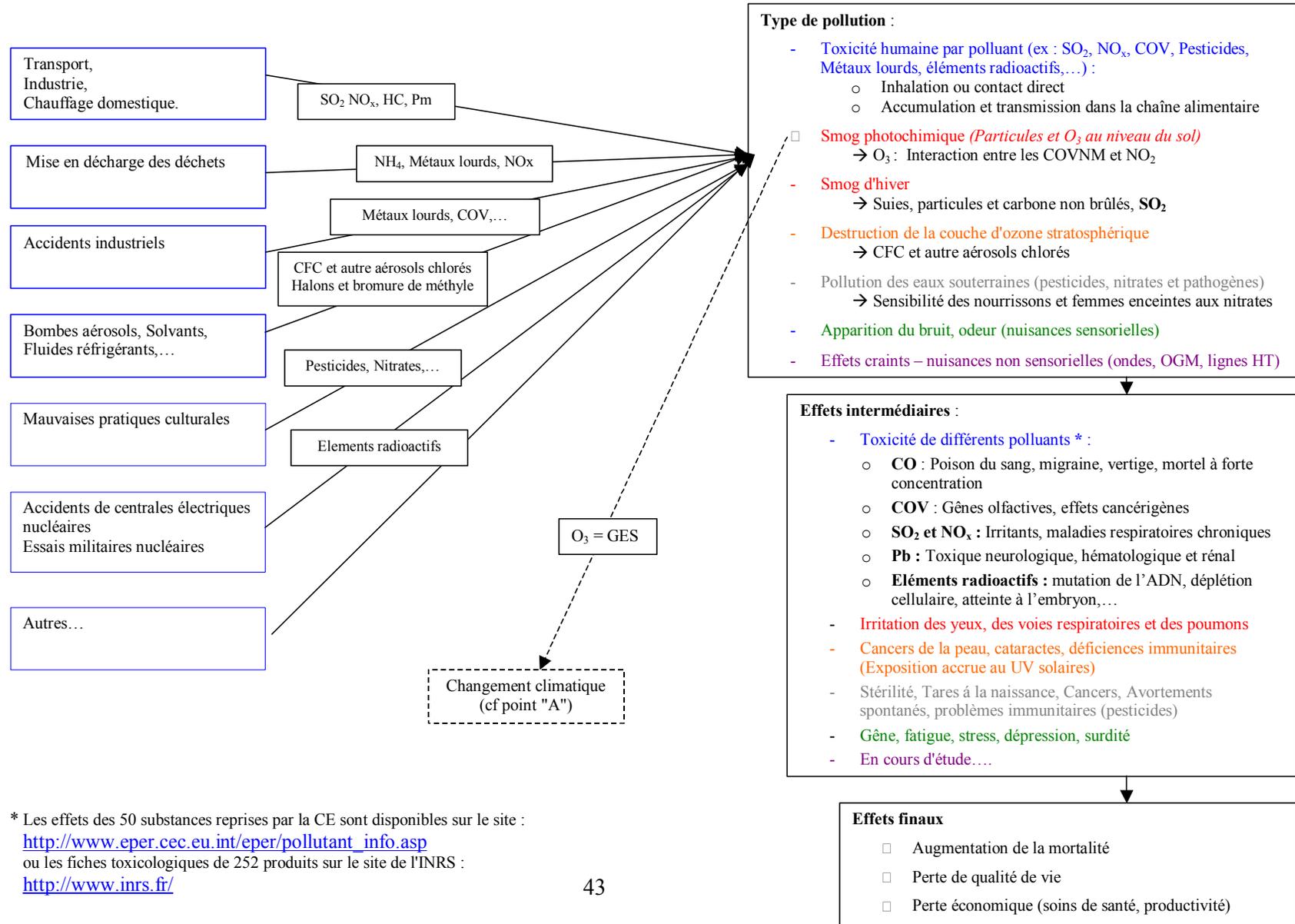
Le Tableau 5 reprend les caractéristiques des enjeux environnementaux associés au thème : "Effet sur la santé humaine".

Tableau 5 : Caractéristiques des enjeux environnementaux associés au thème : "Effets sur la santé humaine"

Description des enjeux environnementaux		Caractéristiques des enjeux environnementaux		
Flux élémentaires	Type de pollution	Domaine d'application	Persistance de l'effet	Etat des connaissances scientifiques
NOx, SO ₂ , CO, O ₃ , COV Métaux lourds (Pb, Hg,...) Particules en suspension ... (www.inrs.f).	Toxicité humaine par polluant	L	R ou RI	Moyen
Production d'O₃ au niveau du sol : Interactions entre COVNM + NO ₂ + UV	Smog photochimique	LG	R	Elevé
Halocarbure : CFC et autres aérosols chlorés Hydrogène	Destruction de la couche d'ozone	G	RI ou I	Moyen Faible concernant l'H ₂
Pesticides Nitrates Pathogènes	Pollution des eaux souterraines	LG	R	Elevé
Bruit Odeur	Nuisances sensorielles	L	R	Elevé
OGM Ondes (portables et autres) Lignes haute tension	Effets craints - nuisances non sensorielles	L	R ou RI (OGM)	Moyen à Faible

La carte de perception des enjeux environnementaux associés au thème "Nature & Biodiversité" est reprise à la Figure 7.

Figure 7 : Carte de perception des enjeux environnementaux associés au thème : "Effets sur la santé humaine"



* Les effets des 50 substances reprises par la CE sont disponibles sur le site :
http://www.eper.cec.eu.int/eper/pollutant_info.asp
ou les fiches toxicologiques de 252 produits sur le site de l'INRS :
<http://www.inrs.fr/>

II.4. UTILISATION DE RESSOURCES NATURELLES

II.4.1. UTILISATION EXCESSIVE DE RESSOURCES NATURELLES RENOUVELABLES

L'épuisement des ressources naturelles renouvelables survient quand le taux d'extraction ou d'utilisation est supérieur au taux de régénération.

Cet épuisement peut être provoqué par trois facteurs :

- **La rareté provoquée par la demande** : l'accroissement démographique ou la hausse des niveaux de consommation tend à provoquer la raréfaction des ressources naturelles accessibles à chaque personne (exemple : chasses intensives d'espèces en voies de disparition comme la baleine).
- **La rareté provoquée par « l'offre »** : la dégradation de l'environnement entraîne la raréfaction d'une ressource naturelle particulière la rendant moins accessible à chaque individu (exemple : acidification des sols qui contribue à la diminution des cations nutritifs dans les sols et entraîne une baisse de la productivité).
- **La rareté d'origine structurelle** : certaines ressources naturelles ne sont disponibles qu'en quantité limitée par rapport à une demande raisonnable.

Les exemples les plus préoccupants sont :

- La diminution des réserves en poissons due à l'intensification de la pêche,
- La déforestation pour augmenter les surfaces cultivables (cultures sur brûlis) ou exploiter les produits de la forêt
- L'utilisation intensive des sols arables, responsable de l'épuisement des éléments nutritifs
- La difficulté d'accès à l'eau potable
- La chasse et le braconnage d'espèces en voie de disparition (effet direct sur la biodiversité).

De manière générale, le développement économique actuel consomme beaucoup trop de ressources naturelles et va conduire à un épuisement de ces ressources à plus ou moins long terme.

Selon le WWF, chaque année, l'utilisation des ressources naturelles renouvelables dépasse en effet de 20%³³ la capacité de la planète à les régénérer et ce chiffre ne fait que croître.

Il est donc primordial, non pas de réduire la croissance économique, mais de consommer mieux : principe du facteur 4 ou 10. Le facteur 4 ou 10 est basé sur le droit de chaque habitant de cette planète, en tenant compte de la croissance de la pollution attendue, d'accéder au même niveau de vie que la moyenne mondiale. La seule solution est dès lors d'accélérer la dématérialisation de la croissance. Ces facteurs revendiquent la réduction de l'intensité matérielle des économies par un certain facteur : pour le facteur 10, cela implique par exemple la réduction des flux de matières de 90% alors que pour le facteur 4, c'est une réduction de 75 %. Le concept de facteur 4 fixe un objectif plus facile à atteindre basé sur l'idée **de 2x plus de performance avec 2 x moins de matière.**

³³ le Rapport " Planète Vivante 2002 " du WWF

NB : Si le sol est considéré comme une ressource « théoriquement » renouvelable, en pratique, cela dépend des moyens économiques consacrés (coût de la dépollution ou de la reconversion). Cette limite fait que, dans les pays industrialisés, le sol est considéré comme une ressource limitée à protéger (exemple au Pays-Bas où la pression démographique est très importante).

II.4.2. UTILISATION DES RESSOURCES NATURELLES NON RENOUVELABLES

Une ressource naturelle est considérée non-renouvelable si elle ne se régénère pas dans des délais qui lui permettent d'être exploitée continuellement. Par exemple, bien que les combustibles fossiles soient continuellement en formation, le taux de transformation de la matière organique est tellement long (millions d'années) qu'à toute fin pratique cette ressource est non-renouvelable.

Deux autres catégories importantes de ressources non renouvelables sont :

- Les minéraux (sable, sel...)
- Les métaux

II.4.3. SYNTHÈSE

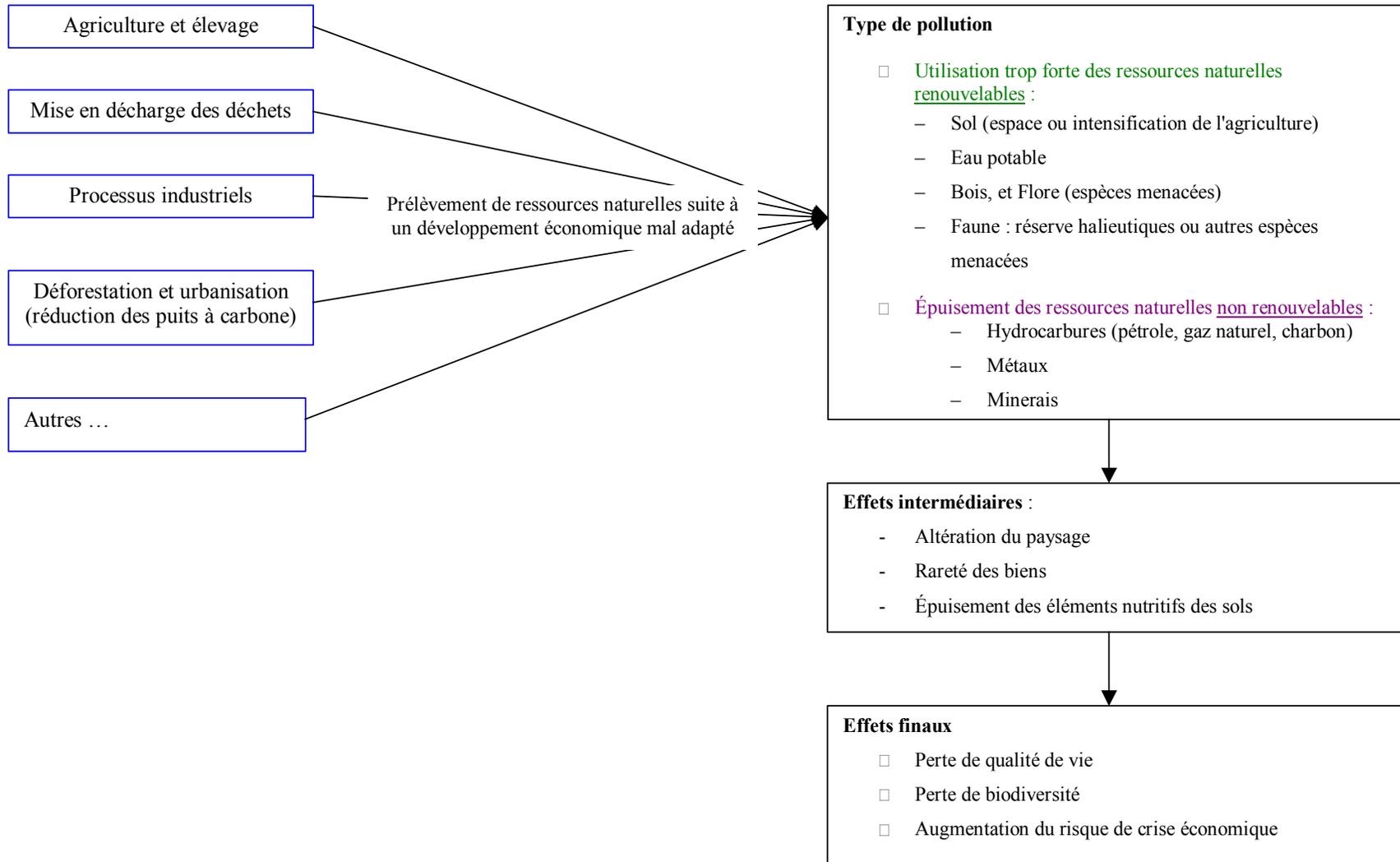
Le Tableau 6 reprend les caractéristiques des enjeux environnementaux associés au thème : "Effet sur la santé humaine".

Tableau 6 : Caractéristiques des enjeux environnementaux associés au thème : "Utilisation des ressources naturelles"

Description des enjeux environnementaux		Caractéristiques des enjeux environnementaux		
Type de pollution	Ressources prélevées	Domaine d'application	Persistance de l'effet	Etat des connaissances scientifiques
Utilisation trop forte de ressources naturelles renouvelables	Sol (fct. des moyens économiques) Eau potable Bois Faune & Flore : Réserve halieutiques Espèces menacées	G	R	Elevé
Epuisement des ressources naturelles non renouvelables	Hydrocarbures : Pétrole, Gaz naturel et Charbon Métaux Minerais	G	RI	Elevé

La carte de perception des enjeux environnementaux associés au thème "Utilisation des ressources naturelles" est reprise à la Figure 8.

Figure 8 : Carte de perception des enjeux environnementaux associés au thème : "Utilisation des ressources naturelles".



III. MÉTHODES D'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE

III.1. ANALYSE DU CYCLE DE VIE

III.1.1. SYNTHÈSE DE LA MÉTHODOLOGIE

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV, ou LCA pour Life Cycle Assessment ou plus familièrement Ecobilan) consiste en une analyse globale des impacts environnementaux dus à un produit ou un procédé tout au long de son cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières jusqu'au traitement final des déchets. Une fois que les impacts sur l'environnement d'une activité humaine ou d'un produit sont connus, des actions peuvent être réalisées afin de les prévenir ou de les limiter. L'approche ACV contribue ainsi à éviter des prises de décision concernant certains stades du cycle de vie qui créeraient un dommage environnemental supérieur à un autre stade.

Les études de type « Analyse de Cycle de Vie » (ACV) présentent les avantages spécifiques suivants :

- **La prise en compte des répercussions environnementales directes et indirectes d'une action.**

Par le fait de considérer le cycle de vie d'une action, les effets tant directs qu'indirects sont pris en compte, permettant ainsi une évaluation plus fidèle de son incidence réelle. Par exemple, si un procédé de traitement consomme des intrants (matières, énergie), l'ACV prend en compte les émissions et consommations de ressources qui auront été nécessaires pour la production de ces intrants et leur acheminement vers le site.

De même, si un procédé de traitement génère des sous-produits valorisables (compost, énergie), l'ACV prend en compte les conséquences de leur valorisation : émissions et consommations supplémentaires et/ou émissions et consommations évitées grâce aux substitutions que permet la valorisation. Par exemple, la valorisation agricole du compost consomme de l'énergie pour l'épandage, mais permet d'éviter la production, l'acheminement et l'épandage d'une quantité de fertilisants minéraux.

- **La prise en compte conjointe et concomitante de plusieurs enjeux environnementaux.**

Ceci est rendu possible par la caractérisation des flux (physiques) élémentaires (exemple : g de CO₂, g de Pb, g de PO₄³⁻, kg de pétrole,...) en catégories d'impact (exemple : augmentation de l'effet de serre, toxicité humaine, eutrophisation, consommation de ressources non renouvelables,...), et, éventuellement, par la pondération de ces catégories d'impact entre elles (calcul d'un écoscore, monétarisation,...).

Cependant, malgré l'existence de cadres méthodologiques (cf. point A : "Description des étapes de l'analyse de cycle de vie"), les praticiens de l'ACV bénéficient d'une marge de manœuvre certaine. Ceci explique que chaque étude ACV est caractérisée par des spécificités d'analyse pouvant impliquer que des études ACV qui étudient une même problématique, une même fonction aboutissent à des résultats pouvant être, en apparence, en contradiction. Ce dernier point, constitue la principale critique des études ACV.

A Description des étapes de l'analyse de cycle de vie

La méthodologie ISO est la méthodologie standard, qui est généralement exploitée dans les études européennes. Elle établit les normes de conduite d'un ACV :

1. ISO 14040 : Principes et cadre
2. ISO 14041 : Définition de l'objectif et du champ d'étude et analyse de l'inventaire
3. ISO 14042 : Étude de cycle de vie
4. ISO 14043 : Guide d'interprétation
5. ISO 14044 : Amélioration du cycle de vie.

Selon cette méthodologie, les étapes d'une analyse ACV sont les suivantes :

- Définition de l'objectif et du champ d'étude
- Inventaire des flux (élémentaires et non élémentaires)
- Caractérisation des flux (classification et contribution aux catégories d'impact)
- Normalisation du score dans chaque catégorie d'impacts
- (Pondération entre catégories d'impacts)
- Revue critique (en vue d'une publication)

Objectif et champ d'application : Il s'agit de préciser clairement quelles sont les attentes du commanditaire de l'étude, et dans quel(s) but(s) les résultats vont être exploités. Le champ d'application doit être défini avec précision, et a trait à la validité géographique et temporelle de l'étude, au niveau de la qualité des données (niveau de détail, représentativité) ainsi qu'à la délimitation du système étudié.

Limites du système : Conformément aux principes fondamentaux des ACV, les impacts sont recherchés par rapport au cycle de vie complet du produit, du matériau ou du service qui constitue l'unité d'étude. Le système étudié se réfère à une unité précise (de produit, de matériau ou de service), appelée 'unité fonctionnelle'. Théoriquement, le système devrait être défini de manière à ce que l'input du monde économique vers le système soit nul et que seul le produit correspondant à la fonction étudiée sorte du système vers le monde économique. Tous les procédés requis à la fonction du système devraient en effet faire partie du système. Pratiquement, ceci n'est pas possible, soit par manque de données ou de temps pour réaliser l'ACV, soit parce que le système de production a comme output, en plus du produit étudié, d'autres co-produits de valeur, produits auxquels une partie des émissions doit être allouée.

Contrairement aux autres phases de l'ACV, cette première étape n'est pas de nature très technique, mais plutôt sociale. Elle nécessite un dialogue entre les différents acteurs de l'étude. Il est donc important que les différents partenaires se montrent ouverts lors de cette phase et que toutes les options et alternatives possibles soient envisagées.

Inventaire : La détermination des impacts environnementaux nécessite de procéder à l'inventaire des flux de matières et d'énergie au sein et aux frontières du système étudié. L'inventaire de ces flux élémentaires est par définition la description quantitative des flux de matière, énergie et polluants ainsi que des nuisances émanant du système. Ces flux, qui sont autant de facteurs d'impacts, sont « ramenés » à l'unité fonctionnelle, c'est-à-dire que l'on convertit l'ensemble du système en un système équivalent, à un seul procédé.

Pour la phase d'inventaire, des bases de données ont été développées reprenant la plupart des procédés pouvant intervenir dans les systèmes étudiés.

Exemples :

- <http://www.sylvatica.com/Database%20summary%20May%202002.pdf>
- <http://www.lci-network.de/cms/content/pid/260>
- <http://www.lcacenter.org>
- <http://www.nrel.gov/lci/>
- <http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/lcaccess/>
- <http://www.apme.org/LCA/>
- ...

Malheureusement, ces informations sont souvent dispersées entre les centres de recherche, les entreprises privées, les universités,... De plus, leur coût et/ou leur complexité les rend difficilement utilisables pour la plus part des utilisateurs.

Pour résoudre ce problème, différentes actions ont été menées :

- **La standardisation du format de données** proposée par ISO sous la forme d'une spécification technique **ISO/TS 14048**. Celle-ci fournit les exigences et la structure pour un format de documentation de données à utiliser en vue d'une documentation transparente et non équivoque. Elle a pour but de faciliter l'échange de données d'inventaire et d'évaluation de cycle de vie.
- **Le projet Ecoinvent 2000** qui regroupe plus de 2500 procédés et est régulièrement mis à jour par le "Swiss Centre for Life Cycle Inventories" (www.ecoinvent.ch). Les données sont issues des bases de données BUWAL et ETH-ESU 96 ainsi que de nombreuses ACV réalisés en Suisse et en Europe. Cette base de données tend à s'imposer comme la référence pour les entreprises et bureaux d'études actifs dans les ACV.
- **L'étude de la Commission Européenne** : "Internet Site on Life-Cycle Assessment Tools and Services and Life-Cycle Inventory Data in support of European Integrated Product Policy". Un des objectifs de cette étude est d'acquérir, d'analyser et de transformer les bases de données existantes sous le format ISO/TS 14048 pour les rendre disponibles aux entreprises (en particulier pour les PME). Cette étude est actuellement en cours et la publication est prévue fin 2005.

Caractérisation des flux : Selon leur nature, les flux élémentaires contribuent à un ou plusieurs types d'impacts environnementaux. Dans l'étape de caractérisation, ils sont d'abord classés dans une ou plusieurs des catégories d'impacts environnementaux standards (voir tableau). Les facteurs de caractérisation définissent ensuite la contribution relative des flux élémentaires à la catégorie d'impact, en les convertissant dans des unités communes.

Catégorie d'impacts	Abréviation
Consommation de ressources non renouvelables	C°R
Consommation de ressources énergétiques	C°E
Destruction de l'ozone stratosphérique	DOS
Ecotoxicité	EcoT
Potentiel de réchauffement climatique	GWP
Potentiel d'acidification	PA
Potentiel d'eutrophisation	PE
Production de déchets finaux	PDF
Toxicité humaine	TH

Plusieurs méthodes de classification et de caractérisation des impacts existent, présentant chacune des points forts, des points faibles et des limites. Leur description dépasse le cadre de ce rapport mais les institutions qui sont à leur origine peuvent être citées:

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change);
- Centre of Environmental Science (CML) - Leiden University (NL);
- EPA (Environmental Protection Agency, USA);
- ETH pour les facteurs « EDPsp-div »³⁴ et « SPEP »³⁵ (spécifiques aux effets des différentes utilisations du sol notamment sur la biodiversité) (CH);
- BREE (Building Research Establishment Ltd, UK);
- Assess Ecostrategy Scandinavia AB (SE) pour les facteurs EPS³⁶;
- EPFL et BUWAL (CH);
- UNEP – SETAC.

La méthodologie relative à l'obtention des résultats par catégorie d'impacts se base donc sur des méthodologies d'analyse largement acceptées et utilisées.

Normalisation (étape facultative mais souvent appliquée) : Les scores obtenus dans chaque catégorie d'impacts peuvent être normalisés en les divisant par un score de référence de la catégorie, afin de pouvoir évaluer la contribution relative du système étudié. La pondération consiste à convertir les résultats des différentes catégories sur base de facteurs choisis de pondération et à les agréger pour obtenir un score unique ou un nombre limité de scores (exemple : méthode Eco-indicateur 99, qui fournit 3 scores, un par thème, pour "Environnement & Santé", "Épuisement des ressources naturelles et « Ecosystèmes »).

L'interprétation donne lieu à des conclusions et à la communication appropriée et transparente des résultats de l'étude.

³⁴ EDPsp-div : ecosystem damage potential, dans le cadre du programme de recherche « COST-Action E9 - Life-cycle assessment of forestry and forest products », 2003, ETH Zürich

³⁵ SPEP : Species-pool Effect Potentials,, dans le cadre de la thèse de doctorat de T. Köllner « Land Use in Product Life Cycles and its Consequences for Ecosystem Quality », 2001, ETH Zentrum HAD

³⁶ EPS : Environmental Priority Strategies

Revue critique (Peer review) : En cas de publications des résultats, les études ACV doivent être revues par un (ou des) évaluateur(s) externe(s) et indépendant(s). Sa(leur) tâche est de critiquer les éléments clefs de l'étude (méthodologie, hypothèses, procédures d'allocation, données, type analyse, conclusions, etc.), relativement aux normes standards d'une part et relativement à l'objectif poursuivi et au champ d'application d'autre part.

A côté de ces étapes méthodologiques reprises dans les normes ISO 14040 à 44, des méthodes de pondération des catégories d'impacts ont été développées pour aider le décideur à faire des choix en tenant compte de l'ensemble des enjeux environnementaux quantifiés par l'ACV.

Si les données de normalisation sont relativement disponibles et consensuelles, la **pondération**, quant à elle, est un sujet beaucoup plus complexe et controversé, en raison de la part de subjectivité qu'elle implique. En effet, les facteurs de pondération peuvent varier en fonction de paramètres géographiques, temporels, politiques, culturels et même personnels en fonction de préférences individuelles à caractère philosophique. Il importe donc que le choix des facteurs soit explicite et transparent et que les données non pondérées soient aussi rendues accessibles. Néanmoins, l'absence de pondération entre catégorie d'impacts rend difficile la comparaison entre produits ou procédés. L'étape de pondération est donc primordiale pour pouvoir justifier un choix d'un système ou d'une politique du point de vue du respect de l'environnement. En effet, nombreuses sont les études qui concluent que tel système est meilleur pour la catégorie d'impact "augmentation de l'effet de serre", équivalent pour "l'acidification" et moins bon pour "l'eutrophisation" laissant le décideur faire un choix personnel (et par définition subjectif) de l'importance relative de ces différentes catégories.

Plusieurs méthodes de pondération peuvent être utilisées dans la réalisation d'une ACV (cf. tableau ci-dessous).

Tableau 7 : Méthodes de pondération utilisées dans la réalisation d'une ACV

Méthode	École	Résumé du principe
Addition par milieux	Midwest Research Institute	Addition des différentes émissions dans l'air entre eux, des rejets dans l'eau entre eux...
Volumes critiques	-Buwal -Agence Japonaise de l'Environnement	Pondération des rejets dans l'eau et dans l'air en faisant référence aux exigences réglementaires (limites de rejets)
Ecofacteurs et écopoints	3ème Buwal	Pondération de tous les facteurs d'impact par les objectifs suisses de rejet ou de consommation de chaque facteur d'impact. L'objectif est d'aboutir à une note unique.

Indices reflétant des problèmes environnementaux (ex. : Eco-indicateurs 99)	Hollande et Suède (méthode la plus employée)	Traduction de chaque consommation ou rejet en terme de contribution à un problème environnemental à l'aide d'indices
Integrated substance chain management (ISCM)	Hollande	Les consommations et rejets sont rapportés au total des consommations et rejets du pays, puis les problèmes sont pondérés entre eux. Aboutit à un chiffre unique.
EPS-System ("méthode Volvo")	Suède	Chaque rejet est affecté d'un score selon 6 critères
Tellus Institute (Boston)	Tellus Institute	Pondération des rejets en fonction des dépenses de santé liées à chaque pollution
Monétarisation		Donne une valeur économique (Euro ou \$) de dommage ou d'évitement pour chaque unité d'impact environnemental.

Parmi ces méthodes, les méthodes permettant d'aboutir à un score unique les plus largement utilisées sont :

- **Eco point** : Selon cette méthode, le score total [écopoints] est donné par l'équation suivante:

$$I = \sum_i (m_i * EP)$$

$$\text{où: } Ep = \frac{c}{F_{ci}} \cdot \frac{F_i}{F_{ci}}$$

F_{ci} : flux critique³⁷ de la substance i dans un pays [tonne/an]

F_i : flux effectif de la substance i dans un pays [tonne/an]

c : coefficient 10^{12} [point/an]

m_i : émission de substance i [tonne]

Le rapport $1/F_{ci}$ consiste à normer par la charge totale critique et le rapport F_i/F_{ci} revient à pondérer l'émission m_i en fonction du rapport entre la contrainte réelle et la charge totale admissible. Les flux critiques (sorte de target flow) dans l'air et l'eau découlent respectivement de la stratégie de lutte contre la pollution de l'air et de la réglementation sur le déversement des eaux usées. Si cette méthode a l'avantage de ne présenter qu'un seul résultat final, il faut noter que les flux critiques sont difficiles à déterminer pour un grand nombre de substances. Une mise à jour de cette méthode doit être publiée en 2005.

³⁷ Nuisance considérée comme critique pour la population.

- **Eco-indicateur 99** : La méthode publiée en 1999 (Goedkoop and Spriensma, 1999) est la première méthode qui tente d'évaluer des dommages aux niveaux des ressources, de la santé humaine et de la qualité de l'écosystème.

Les impacts sur la santé humaine sont exprimés en DALY³⁸ (Disability Adjusted Life Years). Ces impacts sont classés dans les catégories suivantes : effets respiratoires, effets carcinogènes, effet de changement climatique, destruction de la couche d'ozone, radiations ionisantes.

Les impacts sur la qualité de l'écosystème sont exprimés en pourcentage des espèces qui ont disparu dans une zone donnée pendant une période donnée en raison de la pression exercée sur l'environnement. Ces impacts sont classés dans les catégories suivantes : écotoxicité, acidification, eutrophisation et occupation de l'espace et exprimés en :

- Écotoxicité : $PAF^{39} * m^2 * an$: pourcentage d'espèces qui sont exposées à une concentration égale ou supérieure à la concentration sans effet observé.
- Acidification, eutrophisation et occupation de l'espace : $PDF * m^2 * an$: pourcentage d'espèces qui ont une forte probabilité de ne pas être présentes dans une région à cause de conditions défavorables.

Les impacts sur les ressources sont liés à un paramètre exprimant la qualité des ressources minérales et fossiles restantes. Dans tous les cas, l'extraction de ces ressources se traduit par des besoins accrus en énergie pour toute extraction future.

Cette méthode, développée à la demande du Ministère de l'environnement des Pays-Bas (VROM), est une des plus souvent utilisée dans les études ACV (<http://www.pre.nl/eco-indicator99/default.htm>). **NB** : contrairement à la méthode des Eco-points (qui part des flux élémentaires), la méthode Eco-indicateurs 99 part des catégories d'impact.

- **Monétarisation**: donne une valeur économique (Euro ou \$) de dommage ou d'évitement pour chaque flux élémentaires ou catégorie d'impact. Par la conversion de tous les impacts en Euro, la monétarisation constitue une voie pour progresser vers une méthodologie de comparaison directe des performances et d'obtention d'un résultat agrégé. En effet, l'importance des montants associés aux différents impacts du cycle de vie introduit une pondération entre ceux-ci. La monétarisation facilite aussi la prise en compte d'une série d'effets qui sont souvent négligés lors des ACV par manque d'outil de quantification : le bruit, les odeurs, les désagréments... La monétarisation conduit ainsi à l'obtention d'un **résultat (score) unique**, qui peut d'ailleurs intégrer des impacts non-environnementaux.

La monétarisation constitue un domaine complexe où des travaux importants sont en cours. Il existe un certain nombre de publications qui permettent d'obtenir les facteurs de monétarisation des différents impacts. En particulier, pour le secteur du traitement des déchets, la méthodologie de monétarisation a été utilisée par RDC dans le cadre de l'étude réalisée pour la Commission Européenne : *"Évaluation des coûts et bénéfices pour atteindre les objectifs de recyclage et réutilisation pour les différents matériaux d'emballages dans le cadre de la directive des emballages et des déchets d'emballages 94/62/EC"*.

³⁸ L'Année de Vie ajustée au Handicap est la seule indication quantitative de l'importance de la maladie, qui reflète la perte de vie pour toutes sortes de raisons, que ce soit dû à la mortalité prématurée ou à un quelconque degré d'incapacité pendant une certaine période.

³⁹ Potentially Affected Fraction of species.

Des études récentes portent sur l'application de la monétarisation dans le contexte des ACV⁴⁰. Citons également le projet de recherche ExternE, soutenu par la Commission Européenne, qui aborde les externalités dans le secteur de l'énergie. Il est aussi noté par les praticiens des ACV que le développement de bases de données contenant des facteurs de coûts externes applicables dans le cadre des inventaires des cycles de vie serait très utile. Au niveau des impacts environnementaux locaux (bruit d'un générateur, odeur, impact sur un écosystème sensible ou des espèces menacées,...), l'estimation de leurs facteurs monétaires doit encore être affinée et peu de données sont actuellement disponibles.

Il est important de noter que la méthode de monétarisation, comme toutes les méthodes qui incluent une pondération, doit être appliquée de façon prudente. Elle peut être utilisée comme un **filtre** qui permet d'éliminer de la discussion les impacts négligeables et de centrer ainsi l'évaluation des résultats sur les impacts principaux et d'établir des priorités d'action.

B Enjeux environnementaux pris en compte

Il est important de faire la distinction entre :

- ✓ les **flux élémentaires** : consommation de ressources, émissions de polluants dans l'air, l'eau et le sol ; on peut y inclure les nuisances (bruit, désagrément,...)
 - en principe, tous les flux élémentaires peuvent être pris en compte
- ✓ les **catégories d'impacts** : agrégation des flux élémentaires en divers «types de pollution»
 - le Tableau 8 reprend les catégories d'impact évaluées lors d'une ACV.
- ✓ les **méthodes de pondération** existantes (Eco-indicateur 99, Monétarisation, Eco-point,...) qui permettent de quantifier des enjeux environnementaux plus larges.
 - *Eco-indicateur 99* : dommages aux niveaux de l'utilisation des ressources naturelles, de la santé humaine et de la qualité de l'écosystème
 - *Monétarisation* : quantification des effets finaux supportés par la société liés aux catégories d'impacts ou à d'autres pollutions comme le bruit, les désagréments,... En théorie, tous les types de pollution peuvent être monétarisés. En pratique, les développements méthodologiques sont toujours en cours et de nombreux facteurs font encore défaut ou font l'objet de discussion.
 - *Eco-Point* : comparaison des émissions avec le flux maximum de polluant fixé par des Autorités.

⁴⁰ E. Labouze, V. Monier, J.-B. Puyou, *Study on external environmental effects related to the life cycle of products and services. Pour la Commission Européenne, DG Environnement. Février 2003.*

Tableau 8 : Catégories d'impact prises en compte dans une ACV

Catégorie d'impacts	Domaine d'application	Flux élémentaires principaux	Facteur de caractérisation	Description du facteur de caractérisation
Augmentation de l'effet de serre	Global	CO ₂ , NO ₂ , CH ₄ , CFCs, HCFCs, CH ₃ Br	Potentiel de réchauffement global	équ. CO ₂
Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	Global	CFCs, HCFCs, CH ₃ Br, Halon	Potentiel de destruction de la couche d'ozone	équ. CFC-11
Acidification	Régional Local	SO _x , NO _x , HCL HF, NH ₄	Potentiel d'acidification	équ. H ⁺
Eutrophisation	Local	PO ₄ , NO, NO ₂ , NH ₄	Potentiel d'eutrophisation	équ. PO ₄
Smog photochimique	Local	NMVOC	Potentiel de création d'oxydant photochimique	équ. C ₂ H ₆
Ecotoxicité dans le sol	Local	Polluants toxiques pour les rongeurs	DL ⁴¹ ₅₀	équ. habitant
Ecotoxicité dans l'eau	Local	Polluants toxiques pour les poissons	DL ₅₀	équ. habitant
Toxicité humaine	Global Régional Local	Polluants toxiques dans l'air, l'eau et le sol	DL ₅₀	équ. habitant
Prélèvement des ressources	Global Régional Local	Quantité de minéraux Quantité d'énergie	Potentiel de réduction des ressources	Ratio entre la quantité de ressources utilisées et les réserves prouvées
Utilisation de l'espace	Global Régional Local	Quantité mise en décharge	Déchets solides	Volume des déchets sur base de la densité

Les ACV ne visent pas à couvrir l'ensemble de la problématique environnementale : seul ce qui est quantitatif (mesurable), et extensif (sommable), est pris en compte. De même, les effets intermédiaires et finaux ne sont pas quantifiés (sauf dans le cas de la monétarisation). Les effets locaux sont également difficilement pris en compte dans une ACV tel que définie par les normes ISO 14040 - 44.

⁴¹ Dose létale

Les enjeux environnementaux qui ne sont pas pris en compte dans les ACV sont :

Au niveau des changements climatiques :

- l'augmentation de la teneur en aérosols dans la stratosphère

Au niveau de l'utilisation des ressources naturelles :

- la disparition des espèces floristiques ou faunistiques
- l'altération du paysage

Au niveau des effets sur la santé humaine :

- le bruit, les odeurs (sauf via la monétarisation)
- Les indicateurs d'impacts environnementaux fournis par une ACV sont difficiles à interpréter en termes sanitaires. L'introduction de la notion de potentiel toxique humain (Human Toxicity Potential HTP) à la fin des années 1990 a toutefois constitué une première tentative dans ce contexte. Cet indicateur permet de pondérer les émissions inventoriées au moyen d'une ACV en fonction de leur toxicité respective et de les agréger sous la forme d'un composé de référence. Cependant, cette approche ne représente pas l'exposition des populations aux différentes substances émises dans l'environnement puisque la localisation respective des sources d'émissions et des populations n'est pas prise en compte. **L'ACV quantifie les émissions mais pas les effets** sur la santé humaine.
- les effets craints (OGM, lignes à très haute tension, ondes,...)

Au niveau des rejets dans l'air :

- tous les enjeux sont quantifiés au niveau des catégories d'impact (pas les effets intermédiaires ni finaux) mis à part l'augmentation de la teneur en aérosols (particules en suspension)

Au niveau des rejets dans l'eau :

- la pollution microbiologique (pathogènes, bactéries, virus)
- l'excès de matières organiques ou de sédiments
- l'augmentation de la teneur en pesticides
- le développement d'espèces colonisatrices
- l'augmentation de la température de l'eau et de la salinité
- la présence de déchets solides en mer ou le long du littoral (effet local)

Au niveau des rejets dans le sol :

- la perte d'éléments nutritifs dans le sol dû à l'acidification des sols
- la dégradation de la structure du sol (qui entraîne une diminution de la fertilité et des problèmes d'érosion)

III.1.2. PRINCIPAUX DOMAINES D'APPLICATION

Les applications des Analyses de Cycle de Vie peuvent être regroupées en 3 catégories :

- **Quantifier l'impact environnemental d'une politique ou d'un choix stratégique** (choix d'investissement, choix de fournisseur, choix de mode d'élimination des déchets), afin de connaître les changements engendrés par cette décision par rapport à la situation précédente.
- **Comparer des produits entre eux.** Dans le cas d'une comparaison, il faut que les différents systèmes remplissent la (les) même(s) fonction(s) pour que cette comparaison soit légitime. On définit pour cela "l'Unité Fonctionnelle" des systèmes à comparer. Le but d'une comparaison est toujours in fine de favoriser les produits (systèmes) propres, soit pour mener directement à un choix (achats verts par les autorités, choix de technologie propre), soit en incitant les autres acteurs à faire un choix, via la sensibilisation (écolabels, guides), l'imposition (normes de produits) ou l'incitant financier (subsidés de recherche ou d'investissement, écotaxes). Comme certaines décisions ne sont fondées que sur des a priori ou des informations fragmentaires, les ACV servent également à certains acteurs pour démontrer qu'un choix d'autres acteurs est erroné (lobbying).
- **Améliorer la performance environnementale d'un seul système** (éco-conception). Typiquement, quand un seul système est analysé, le but est d'en améliorer les performances, que ce soit au niveau de la conception (éco-conception), du développement (amélioration d'un produit existant) ou de l'utilisation (par exemple, faut-il ou non déconseiller d'utiliser l'air conditionné dans la voiture ?). On détermine quelles sont les étapes et les impacts clés du système (produit) qui reçoivent alors une attention prioritaire.

L'ACV peut donc répondre à des **besoins internes** :

- Gestion des flux matières et énergie d'un site
- Comparaison inter-sites
- Optimisation de la fin de vie des produits et des emballages
- Aide à la conception de produits

ou à des **besoins externes** :

- Communication Environnementale : IPP, EPD, achats verts
- Dialogue client/fournisseur
- Lobbying (local, régional, national, européen)

III.1.3. LIMITES DE LA MÉTHODE

Les ACV sont des analyses potentiellement très complètes et rigoureuses, permettant d'apporter avec une grande fiabilité la réponse à un questionnement défini par rapport à un contexte précis.

Par exemple ,les ACV sont à même de fournir des réponses fiables à des questionnements de type : dans une région X, où les déchets sont collectés de telle façon et ont telle composition, est-il préférable d'avoir recours à la filière de gestion Y, caractérisée par les paramètres Py, ou d'une filière de gestion Z, caractérisée par les paramètres Pz ?

La méthodologie relative à l'obtention des résultats par catégorie d'impacts se base sur des méthodologies d'analyse largement acceptées et utilisées. Par contre l'interprétation des résultats via la pondération des catégories d'impact fait encore l'objet de discussions et repose souvent sur des consensus.

La modélisation de la fonction étudiée entraîne une spécificité telle que les résultats et conclusions fournis par une étude ACV sont rarement directement extrapolables à un contexte qui diffère de celui défini dans une étude. Ils sont encore moins généralisables.

Parmi les hypothèses de modélisation, il faut distinguer:

- les hypothèses liées aux conditions locales intrinsèques
- les hypothèses liées aux paramètres technologiques maîtrisables
- les hypothèses liées aux objectifs et au champ de l'étude (à définir au préalable).

Si les conclusions restent stables quand les paramètres maîtrisables le sont, alors on a une généralisation possible. Si les conclusions varient en fonction des conditions locales, alors il n'y a pas de généralisation possible.

En d'autres termes, il faut distinguer :

- la **fiabilité** des résultats ACV : mesure de l'exactitude avec laquelle elles répondent à la question posée,
- la **validité** de résultats ACV : limitée à un domaine défini tant par les hypothèses méthodologiques que les hypothèses de modélisation.

Trop souvent, la limitation du champ d'application (de validité) des résultats est perçue, à tort, comme un manque de fiabilité. Par analogie, si on mesure que les mois de juin, juillet et août sont les plus chauds, le résultat est fiable mais des chercheurs australiens auront vite fait de démontrer le contraire.

Les résultats d'une étude ACV sont inévitablement caractérisés par une incertitude, liée à la difficulté de définition et de modélisation d'une réalité complexe (des hypothèses simplificatrices sont faites, des valeurs moyennes sont prises). Cette incertitude influence potentiellement fortement les résultats. Elle ne réduit cependant pas la qualité de l'ACV pour autant que les résultats soient suffisamment cernés au moyen d'analyses de sensibilité.

La fiabilité des résultats d'une étude ACV est parfois fortement limitée par le manque de méthodologie d'évaluation de certains types d'impacts : les effets sensibles à la situation locale (le bruit et les vibrations, les odeurs, les poussières), les émissions toxiques, les déchets radioactifs, la valorisation des matières organiques, la prise en compte de la sensibilité du milieu,...

Dans le cadre de la **prise de décision**, ces états de fait impliquent que le fondement de l'argument environnemental reposant sur des résultats d'ACV ne peut reposer que sur les deux piliers suivants :

- ✓ d'une part les conclusions des études ACV, qui doivent être caractérisées :
 - **par un jeu d'hypothèses méthodologiques pertinentes,**
 - **par un jeu d'hypothèses de modélisation acceptables en rapport au contexte concerné par cette prise de décision ;**
- ✓ d'autre part, sur les quelques tendances fortes et généralisables du bilan des connaissances ACV.

Lors de la lecture d'ACV, les précautions de lecture suivantes sont de mises :

La lecture des résultats d'une étude ACV doit toujours se référer à la définition des objectifs et du champ d'application de l'étude qui, sous l'apparence d'un même titre, peuvent varier fortement et conduire à des conclusions opposées.

A titre d'exemple, citons le cas théorique d'une étude ACV comparant l'impact environnemental du transport en avion et du transport en voiture de Paris à Madrid : Pour une même question : "d'un point de vue environnemental, vaut-il mieux aller de Paris à Madrid en voiture ou en avion ?", la conclusion d'une ACV peut être :

- **Oui** : si il s'agit d'un choix politique de mettre en place ou non une nouvelle correspondance pour le transport de 500 vacanciers en juillet et août. Dans ce cas, on doit considérer la consommation énergétique globale des voitures et des avions nécessaires.
- **Non** : si il s'agit d'une personne voulant se rendre seule à Madrid en utilisant les lignes existantes. Dans ce cas, on doit considérer l'impact environnemental lié à la surconsommation énergétique pour le transport d'une personne (ce qui est négligeable dans le cas de l'avion).

Dans cet exemple, on voit que la définition précise de la question est d'une grande importance.

- Attention à la sélection des catégories d'impact considérées par l'analyse.
- Attention à la pertinence des hypothèses, qui est très fortement liée à la modélisation du contexte technologique et au contexte géographique de l'étude.
- Attention à la forme des résultats servant à l'interprétation : résultats bruts par catégorie d'impact, résultats normalisés par catégorie d'impact, résultats pondérés sur un nombre déterminé de catégories d'impact, etc.
- Attention aux modalités de normalisation et de pondération des résultats, qui permettent de tenir compte des paramètres locaux (ex : l'acidification est moins « grave » dans certaines régions par rapport à d'autres, en lien avec l'état des sols) mais augmentent la spécificité et réduisent le domaine de validité des conclusions.

III.1.4. POUR EN SAVOIR PLUS

German Network of LCI Data :

<http://www.lci-network.de/cms/content/lang/en/pid/5;jsessionid=3F6C5EA98B36B7755C1B01EC10394283>

SETAC Life-Cycle Assessment : <http://www.setac.org/lca.html>

UNEP/SETAC Life Cycle Initiative: <http://www.unep/ie.org/pc/sustain/lcinitiative/>

Ecole polytechnique de Montréal (liens intéressants) : <http://www.cours.polymtl.ca/gch6310/nouvellepage5.htm>

LCA Software : <http://www.life-cycle.org/>

American Center for LCA : <http://www.lcacrcenter.org/America>

Cours de l'EPFL sur les LCA : http://gecos.epfl.ch/lcsystems/fichiers_pour_etudiants/polycop_ecobilan2002a.pdf

III.2. L'ÉVALUATION DU RISQUE SANITAIRE

III.2.1. SYNTHÈSE DE LA MÉTHODOLOGIE

A Description de la méthode

Si l'évaluation environnementale est maintenant largement utilisée pour mesurer les effets négatifs des activités humaines sur l'environnement, la santé reste souvent un volet négligé de l'analyse ou, si elle est prise en compte, c'est de manière séparée, et principalement sur des installations industrielles plutôt que sur des produits ou des services. On estime en effet que 90 à 95% de toutes les évaluations environnementales ne sont pas assorties d'évaluations suffisantes en matière de santé et de sécurité, et ne contiennent pas d'avis d'expert en la matière⁴².

Depuis une dizaine d'années, plusieurs approches ont été développées en France et au niveau international pour évaluer les impacts sanitaires des émissions industrielles. Elles peuvent être classées selon les catégories suivantes :

- L'évaluation des risques sanitaires (ERS),
- Les études épidémiologiques qui consistent à collecter des données auprès de la population sur les pathologies observées après une exposition plus ou moins longue à une substance (ou un groupe de substances),
- Les études de biomonitoring dans l'environnement, les chaînes alimentaires et les populations humaines qui consistent à suivre l'évolution de la teneur en substances chimiques dans les organismes.

Le présent rapport porte principalement sur l'ERS qui, en France, s'est développée suite à l'imposition d'étudier les effets d'un projet sur la santé humaine lors des études d'impacts (article 19 de la loi n° 96-1236 du 30 décembre 1996). Cette contrainte législative place la France à la pointe en matière d'évaluation des risques sanitaires. Dans les autres pays européens, l'évaluation des risques sanitaires est restreinte à quelques rares projets et consiste en une comparaison des rejets de substances avec des valeurs limites réglementaires⁴³.

L'évaluation des risques pour la santé humaine (ERS ou EQRS⁴⁴) est née aux Etats Unis, à l'aube des années quatre-vingt, des travaux du « *Scientific committee on problems of the environment* ». Elle a été développée par le NRC⁴⁵ et l'US-EPA⁴⁶. Selon la définition donnée par le NRC en 1983, l'évaluation des risques sanitaires est «... *l'utilisation de faits [scientifiques] pour définir les effets sur la santé d'une exposition d'individus ou de populations à des matériaux ou à des situations dangereuses* ».

L'intention explicite était de développer un cadre méthodologique permettant l'usage de résultats de recherche dans des stratégies de gestion du risque sanitaire scientifiquement fondées : définition de

⁴² Source : DAVIES D.PHIL., Katherine - Ecosystems Consulting Inc. et SADLER, Barry - Institute of Environmental Assessment, pour le Ministre des Approvisionnements et Services - Canada, (Mai 1997) "Évaluation environnementale et santé humaine : perspectives, approches et orientations" "Document d'information pour l'étude internationale sur l'efficacité de l'évaluation environnementale", 56p.

⁴³ RE.C.O.R.D a publié une étude en 2004 sur : "L'état de l'art et pratiques au niveau international concernant la prise en compte des impacts sanitaires des filières de traitement des déchets".

⁴⁴ Evaluation Quantifiée des Risques sanitaires, synonyme de l'ERS.

⁴⁵ Nuclear Regulatory Commission.

⁴⁶ US Environmental Protection Agency

valeurs limites d'exposition humaine, de normes d'émission ou de dépollution, mais aussi établissement de priorités dans le calendrier des réglementations et des programmes de recherche.

Ce type d'analyse permet de traiter tant des situations génériques, à l'échelle d'une population entière, que des cas très spécifiques ou ponctuels d'exposition humaine à un ou plusieurs agents dangereux.

L'ERS a pour la première fois été appliquée aux rayonnements ionisants et son champ d'application s'est rapidement étendu aux substances chimiques cancérigènes. Elle étudie désormais les risques sanitaires de toute origine, y compris microbiologique, tous les milieux de l'environnement, et s'étend maintenant à l'étude des impacts sur les écosystèmes⁴⁷. Si les principes méthodologiques d'évaluation des risques pour l'homme ou pour d'autres espèces animales sont identiques, la démarche pour ces dernières trouve sa complexité dans la différence d'échelle (grand nombre d'espèces, variété des structures des écosystèmes, taille des écosystèmes,...). Une description de la méthode d'évaluation des risques pour les écosystèmes est reprise au chapitre III.3.

L'ERS est structurée en quatre étapes successives dont l'ordre peut varier mais qui doivent toujours être bien différenciées:

- **l'identification des dangers** : l'objectif est d'identifier l'ensemble des substances dangereuses susceptibles d'être émises sur le site et de choisir des « polluants marqueurs », typiques de l'activité étudiée, qui vont servir de base à l'évaluation (exemple : SO₂, NO₂, Particules, dioxines,...).
- **la définition des relations dose-réponse**, qui a pour but de définir une relation quantitative entre la dose administrée ou absorbée et l'incidence de l'effet. La quantification de cette relation est exprimée par des indices toxicologiques regroupés sous le terme générique de Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR). Les VTR sont repris dans la littérature ou dans des bases de données toxicologiques. Cette étape repose sur l'interprétation des résultats de l'observation médicale, des études épidémiologiques et toxicologiques. L'idéal est de disposer d'observations épidémiologiques chez l'homme. A défaut, des résultats expérimentaux (sur l'animal) peuvent être utilisés. L'Institut de Veille Sanitaire a publié un rapport sur les méthodes d'élaboration des VTR (cf. III.2.4 : "Pour en savoir plus").
- **l'évaluation de l'exposition humaine** qui consiste, d'un côté, à identifier les personnes exposées (âge, sexe, caractéristiques physiologiques, éventuelles pathologies et sensibilité, effectifs) et les voies de pénétration des agents toxiques. De l'autre, elle doit quantifier la fréquence, la durée et l'intensité de l'exposition à ces substances (exprimée par une dose moyenne journalière ou, pour l'inhalation, par une concentration moyenne dans l'air) pour chaque voie pertinente. Cette étape, la plus complexe de l'ERS (du point de vue de l'évaluateur), fait appel soit à des mesures analytiques sur le terrain, soit à des modèles de dispersion (de type gaussien ou 3D) ou, plus généralement, des modèles de transfert des polluants à travers l'air, l'eau et/ou le sol.

⁴⁷ L'évaluation des risques environnementaux fait l'objet d'approches méthodologiques spécifiques en France et sur le plan international. En 2004, RE.C.O.R.D a commandé une étude intitulée : "*Méthodes d'évaluation des risques environnementaux et risque acceptable : état des lieux, étude comparative*". La publication de cette étude est prévue pour fin 2005.

- **la caractérisation des risques sanitaires** est une estimation quantitative du risque lié aux polluants. Elle fait la synthèse, pour un polluant donné, des données d'émissions, des voies d'exposition et des relations dose-réponse. Cette étape aboutit à l'estimation d'un excès de risque individuel et au calcul de l'impact de ce risque.

Dans le cas d'un effet toxique sans seuil on calcule l'excès de risque individuel (ERI) pour chaque voie d'exposition en multipliant l'excès de risque unitaire ER_u (valeur toxicologique de référence pour les produits cancérigènes) par la dose moyenne journalière ou la concentration moyenne dans l'air. On calcule également l'impact sanitaire (IS) c'est-à-dire le nombre de cas attendus en multipliant l'ERI par l'effectif (n) de la population qui lui est soumise⁴⁸.

Dans le cas d'un effet toxique à seuil, il s'agit de comparer l'exposition attribuable à la source d'émission à des valeurs de référence publiées dans la littérature. Le risque sanitaire s'évalue directement par le ratio (RD) entre l'immission attribuable C à la source et cette référence. Un RD inférieur à 1 signifie que la population exposée est théoriquement hors de danger, alors qu'un quotient supérieur à 1 signifie que l'effet toxique a pu se déclarer, sans qu'il soit possible de prédire la probabilité de survenance de cet événement.

NB : Des logiciels offrent la possibilité de réaliser une analyse du risque en couplant les résultats d'un modèle de dispersion à la méthodologie d'évaluation du risque sanitaire. En particulier, la plupart des logiciels intègrent le : « Human Health Risk Assessment Protocol » développé par les scientifiques de l'US-EPA. Ce protocole fournit un guide technique sur la manière de conduire une étude de risques sanitaires. Il reprend les étapes méthodologiques décrites ci-dessus et fournit une source de données exhaustive quant aux informations requises tout au long de la procédure.

B Enjeux environnementaux pris en compte

L'ERS porte uniquement sur les impacts affectant l'homme par absorption directe ou indirecte (via la chaîne alimentaire) de substances dangereuses. Cette méthode est, par essence, centrée sur les impacts locaux.

Dans le thème : "Effet sur la santé humaine", les enjeux environnementaux pris en compte sont :

- **Toxicité humaine par polluant** : sur les 30.000 substances chimiques⁴⁹ potentiellement dangereuses, seules les substances pour lesquelles une VTR a été établie peuvent être étudiées. Pour les autres, le manque de données et les incertitudes scientifiques ne permettent pas de déterminer leurs effets sur la santé. En réponse à une question posée sur le site de l'Observatoire des pratiques de l'évaluation des risques sanitaires dans les études d'impact (http://www.sante.gouv.fr/htm/dossiers/etud_impact/), relative à l'absence de VTR pour certaines substances, le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France préconise : « d'écarter volontairement l'utilisation des repères autres que les VTR pour la quantification du risque » et précise : « en l'absence de VTR, une quantification des risques n'est pas envisageable même si les données d'exposition sont »
- **Le smog photochimique et le smog d'hiver**: qui sont pris en compte à travers l'effet des substances polluantes responsables de ces phénomènes.

⁴⁸ Dans le cas du risque de cancer, calculé par convention sur une période de référence de 70 ans, l'impact annuel dans une population d'effectif total N, au sein de laquelle l'ERI moyen a été calculé, est défini comme suit $IS = ERI \times \frac{N}{70}$

⁴⁹ Commercialisées à plus d'1 tonne/an.

L'ERS n'apporte donc des réponses que sur certaines pathologies liées à des substances polluantes pour lesquelles il existe des VTR. En revanche, la surveillance sanitaire peut s'intéresser à ces aspects⁵⁰. De plus, comme cette méthode se concentre sur les effets locaux, les phénomènes à l'échelle de la planète comme : « la destruction de la couche d'ozone », « l'augmentation de l'effet de serre » qui, in fine, ont des conséquences sur la santé humaine ne sont pas pris en compte.

NB : les études épidémiologiques sont complémentaire à l'ERS (elles contribuent notamment à la détermination des VTR) mais font encore défaut pour de nombreuses substances et types d'exposition.

III.2.2. PRINCIPAUX DOMAINES D'APPLICATION

En France, l'article 19 de la loi n° 96-1236 du 30 décembre 1996 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie apporte des compléments aux études d'impact sur l'environnement. Aux termes de l'article 19, doivent désormais être étudiés et présentés dans l'étude d'impact, les effets du projet sur la santé humaine et les mesures envisagées pour supprimer, réduire et, si possible, compenser les conséquences dommageables du projet pour l'environnement et la santé.

Les secteurs particulièrement concernés par cette obligation sont :

- L'élevage (17,5% des dossiers d'études d'impacts)
- Les activités relatives au traitement des déchets (13,4%)
- Les activités de la chimie, de la parachimie et du pétrole (12%)

En dehors de cette contrainte législative, des ERS peuvent être menées en réponse aux préoccupations des riverains sur les risques qu'ils encourent ou dans le cadre d'études de réhabilitation de sites pollués. Le principal avantage de l'évaluation des risques sanitaires est de tenir compte des incertitudes scientifiques en formulant explicitement une série d'hypothèses. L'ERS permet de faire le lien entre les sciences de l'environnement et les impératifs de santé publique. Ceci permet de réaliser des simulations et d'aider les décideurs à optimiser leurs choix. L'ERS contribue ainsi à rendre transparents, donc opposables et perfectibles, des choix qui ne doivent plus être refusés au nom de l'incertitude scientifique, sauf en ce qui concerne les polluants pour lesquels il n'y a pas de VTR disponible.

III.2.3. LIMITES DE LA METHODE

Toute évaluation des risques sanitaires comporte deux grandes phases :

- une analyse des propriétés intrinsèques de la substance chimique : identification des dangers et définition des relations dose-réponse,
- une étude de l'exposition humaine.

Ces deux phases mènent à la caractérisation des risques sanitaires.

L'étude de l'exposition humaine repose sur une analyse de données largement disponibles dans la littérature, couplée, le cas échéant, à des enquêtes de terrain complémentaires.

Par contre, **la connaissance** précise des propriétés intrinsèques d'une substance et de ces effets potentiels **fait défaut pour un très grand nombre de substances**.

⁵⁰ La surveillance sanitaire est un processus continu de recueil, d'analyses et de diffusion de données, pouvant être également pris au sens d'une répétition régulière de l'information dans le temps. Elle nécessite de construire un système permettant d'acquérir de façon organisée, un recueil de données standardisé

Sur les 30 000 substances commercialisées en quantités supérieures à 1 tonne/an, seulement 140 ont été recensées en tant que substances prioritaires et font l'objet d'une évaluation des risques réalisée par les autorités des États membres de l'Union Européenne. Cette évaluation du risque se base souvent sur l'extrapolation des données toxicologiques valables pour les animaux vers l'humain et sur l'extrapolation des effets observés pour des doses élevées à des doses faibles. Ces deux approximations sont loin de faire l'unanimité auprès de la communauté scientifique.

Dans son livre blanc sur la "*Stratégie pour la future politique dans le domaine des substances chimiques*"⁵¹, la CE souligne le fait *qu'il y a une méconnaissance générale des propriétés et des utilisations des substances existantes. La procédure d'évaluation des risques est lente et consommatrice de ressources, et ne permet pas un fonctionnement efficace et rentable du système..., ...il est difficile d'obtenir des informations sur les utilisations des substances, et les informations disponibles sur l'exposition qui résulte des utilisations en aval sont généralement très limitées. La décision de soumettre des substances à des essais complémentaires ne peut être prise que par le biais d'une longue procédure de comité et l'industrie ne peut faire une demande en ce sens qu'après que les autorités ont prouvé qu'une substance peut présenter un risque sérieux. Cependant, en l'absence de résultats d'essai, il est quasiment impossible d'apporter une telle preuve. C'est la raison pour laquelle nous ne disposons d'évaluations des risques définitives que pour un petit nombre de substances.* "

Face à ce constat, la Commission propose qu'à l'avenir, après intégration progressive des substances existantes jusqu'en 2012, les substances existantes et les substances nouvelles fassent l'objet d'une même procédure définie dans le cadre d'un système unique. Le système proposé est dénommé **REACH** (de l'anglais Registration (enregistrement), Evaluation (évaluation) and Authorisation (et autorisation) of Chemicals (des substances chimiques)). Les exigences requises par le système REACH, notamment en matière d'essais, sont fonction des propriétés dangereuses avérées ou présumées des substances chimiques, des utilisations, de l'exposition et des quantités produites ou importées. Toutes les substances chimiques produites ou importées en quantités supérieures à 1 tonne devront être enregistrées dans une base de données centrale. Pour les quantités plus importantes, il conviendra d'accorder une attention particulière aux effets chroniques et à long terme. C'est l'industrie qui devra assumer la responsabilité de l'évaluation des risques. C'est donc au fabricant ou à l'importateur, ainsi qu'à l'utilisateur en aval, de mener à bien l'évaluation des risques sur les substances et les préparations.

NB : Cette directive est actuellement⁵² en cours de discussion et des modifications pourraient encore être apportées, notamment sur le nombre de substances concernées.

Une autre limite de cette méthode est la difficulté d'utiliser les résultats pour communiquer auprès du grand public. En effet, les résultats sont présentés en terme d'augmentation de la probabilité d'apparition d'une maladie qui ne se traduit pas directement en un effet visible sur la population.

III.2.4. POUR EN SAVOIR PLUS

Le guide INERIS pour la réalisation des études sanitaires et le guide InVS pour leur lecture critique reprennent la méthodologie détaillée.

Ces deux guides sont disponibles aux adresses suivantes :

- <http://www.invs.sante.fr/publications/default.htm>
- http://www.sante.gouv.fr/htm/dossiers/etud_impact/ine_ei51.pdf

⁵¹ http://www.europa.eu.int/comm/environment/chemicals/pdf/0188_fr.pdf

⁵² en 2005

Projet REACH :

<http://www.europa.eu.int/comm/environment/chemicals/reach.htm>.

Méthode d'élaboration des VTR :

http://www.invs.sante.fr/publications/2002/val_toxico_ref/val_toxico_ref.pdf

Observatoire des pratiques de l'évaluation des risques sanitaires qui reprend une liste de questions/réponses relatives à l'ERS :

http://www.sante.gouv.fr/htm/dossiers/etud_impact/

III.3. EVALUATION DES RISQUES POUR LES ÉCOSYSTÈMES

Note préliminaire : la rédaction de ce chapitre est largement inspirée de l'étude RECORD n° 04-0810/1A "méthodes d'évaluation des risques environnementaux et risque acceptable : état des lieux, étude comparative". Cette étude présente de manière détaillée les principales méthodes nationales et internationales d'évaluation des risques environnementaux.

III.3.1. SYNTHÈSE DE LA MÉTHODOLOGIE

A Description de la méthode

En France, l'INERIS a proposé en 1999 un guide méthodologique intitulé « Evaluation détaillée des risques pour les écosystèmes ». Inspiré par la méthodologie de l'US EPA, ce document construit son approche sur la base de trois grandes phases : la formulation du problème, l'évaluation des effets et des expositions et la caractérisation du risque.

L'étape préliminaire (formulation du problème) est essentielle car elle conditionne la suite de la procédure. Elle consiste à caractériser l'écosystème et les agents stressants qui permettront par la suite de choisir les paramètres de l'évaluation et d'établir les hypothèses de perturbation de l'écosystème.

Dans un premier temps, il s'agit de compiler toutes les données préalablement acquises lors du diagnostic initial (caractérisation du site et de la pollution, description de l'environnement...) ainsi que lors du diagnostic approfondi (inventaire sommaire des espèces, constats d'impact écologique, concentrations de pollution des sols, eaux, sédiments...) et, si nécessaire, les données concernant le voisinage (localisation de zones humides, usage des terrains voisins, localisation de zones sensibles).

Ensuite, il s'agit de :

- Caractériser le ou les polluant(s) et ses interactions avec l'environnement en termes physiques et chimiques.
- Décrire les voies d'exposition directes (espèces cibles directement en contact avec la pollution) et indirectes (exposition passant par une autre espèce) aux agents stressants et d'identifier la gamme des effets écotoxicologiques pouvant résulter de l'exposition aux polluants.

Cette étape doit conduire aux choix des couples « cible-polluant » en fonction des critères suivants :

- ✓ La pertinence écologique, c'est-à-dire des espèces sensibles ayant un rôle important dans le fonctionnement de l'écosystème ;
- ✓ La pertinence aux objectifs de gestion : s'assurer de la valeur de l'espèce choisie en terme sociologique, économique, récréatif ou autre « espèce protégée par exemple ».

NB : En pratique, il semble que le choix de 15 couples « cible-polluant » soit le maximum acceptable pour l'évaluation.

L'évaluation des expositions va dépendre de :

- **la concentration** et du comportement physico-chimique **du polluant**,
- des voies et **des niveaux d'exposition** d'individus avec le polluant.

Pour évaluer **les niveaux d'exposition et les concentration du polluant**, on utilise deux approches complémentaires :

- ✓ la métrologie (mesure) qui permet l'intégration de la complexité de tous les phénomènes physiques, chimiques et biologiques.
- ✓ la modélisation (approche simplifiée de la réalité) qui permet une représentation sur le long terme et peut aussi simuler des situations fictives (les mesures analytiques peuvent servir comme données d'entrée d'un modèle)

Les doses d'exposition liées à une exposition au milieu i par la voie d'exposition j sont ensuite déterminées par la formule :

$$DJE_{ij} = \frac{C_i \times Q_j \times T \times F}{P \times T_m}$$

Avec :

- DJE_{ij} : Dose journalière d'exposition
- C_i : Concentration d'exposition relative au milieu i (eau, sol, aliment)
- Q_j : Quantité du milieu, c'est-à-dire de sol, d'eau... administrée par la voie j par jour
- T : Durée d'exposition
- F : Fréquence d'exposition
- P : Masse corporelle de la cible
- T_m : Période de temps sur laquelle l'exposition est moyennée

NB : pour la voie respiratoire, les expressions Q_j et P ne sont pas d'application.

La caractérisation du risque correspond à la phase finale de l'évaluation du risque écologique. Il s'agit d'une mise en relation des données d'exposition et des données de l'évaluation des dangers. L'objectif est de fournir aux gestionnaires l'ensemble des éléments nécessaires à la prise de décision.

On considère successivement deux niveaux d'évaluation du risque écologique :

- Un **niveau qualitatif** dont le risque est calculé de la manière suivante : $R = PEC/PNEC$

Avec :

- PEC : concentration d'exposition prévisible
- PNEC : concentration probablement sans effet prévisible

Si $R \geq 1$, on considère qu'il existe un risque pour l'écosystème,

Si $R < 1$, on considère qu'il n'existe pas de risque pour l'écosystème.

NB : le risque peut également être assimilé à une situation considérée comme inacceptable, c'est-à-dire une situation où il y a perte de ressource biologique, qui déclenche une évaluation quantitative du risque écologique.

- Un **niveau quantitatif** qui permet de déterminer l'incertitude liée au risque à l'aide d'un raisonnement probabiliste. L'évaluation quantitative est déclenchée lorsque $R \geq 1$ ou si des effets inacceptables sont observés. Pour chaque scénario d'exposition, on élabore « le cas le plus probable » depuis la source jusqu'à la cible

Il existe différentes approches qui permettent d'estimer le risque en y intégrant quantitativement l'influence de la variabilité et de l'erreur associées aux paramètres utilisés :

- La méthode empirique : elle utilise des procédures strictement statistiques et aboutit à une simple étude des incertitudes liées aux données disponibles. Simple à mettre en œuvre, cette méthode présente l'avantage de caractériser le risque avec un niveau de confiance statistique. La nécessité d'un grand nombre de données fiables et le manque d'adéquation entre les modèles de distribution et la structure réelle des données en constituent les principales limites.
- La méthode mécaniste : elle se base sur l'utilisation de modèle d'exposition et de relations dose-réponse en tenant compte des connaissances théoriques sur les mécanismes mis en jeu. L'avantage de la méthode est d'inclure l'information sur le comportement des polluants et sur les réponses possibles des écosystèmes.
- La méthode expérimentale : elle est basée sur des études au laboratoire ou des écosystèmes artificiels ou des études écologiques de terrain (inventaire faune/flore). C'est la variabilité entre les réplicats qui permet de quantifier l'incertitude et d'estimer le risque. L'avantage de la méthode réside dans son approche de la réalité environnementale mais certaines conditions expérimentales comme la duplication, la durée généralement longue mais également le coût des expérimentations limitent considérablement l'emploi de cette méthode.

Finalement, **l'évaluation des incertitudes** est nécessaire pour l'interprétation et l'explication des résultats. Les facteurs d'incertitudes à considérer sont de trois types :

- Incertitude de type stochastique qui découle de caractéristiques inhérentes du système ;
- Incertitude liée au manque de connaissance ;
- Incertitudes liées aux erreurs de mesure ou au fonctionnement des modèles.

B Enjeux environnementaux pris en compte

L'évaluation du risque pour les écosystèmes porte uniquement sur les enjeux locaux affectant directement les espèces ou les habitats par absorption directe ou indirecte (via la chaîne alimentaire) de substances dangereuses.

III.3.2. PRINCIPAUX DOMAINES D'APPLICATION

Les objectifs de ce type d'évaluation sont :

- Évaluer la menace réelle ou potentielle visant un élément particulier de l'environnement pour la préservation :
 - de la biodiversité ;
 - des ressources biologiques sauvages ;
 - des ressources biologiques agricoles ou forestières ;
 - du cadre de vie.
- Définir des objectifs de réhabilitation spécifiques en fonction des usages futurs du site ;

- Établir un ordre de priorité de réhabilitation lorsque des facteurs limitants (contrainte technico-économique par exemple) gênent la mise en oeuvre de la réhabilitation ;
- Fournir d'avantage d'informations pour prendre une décision quant à la gestion du site.

III.3.3. LIMITES DE LA MÉTHODE

Comme pour l'ERS, une limite de cette méthode est la difficulté d'utiliser les résultats pour communiquer auprès du grand public. Les résultats étant présentés en terme d'augmentation de la probabilité qui ne se traduit pas directement en un effet visible sur la population.

Une des différences les plus caractéristiques entre l'évaluation des risques sanitaires et l'évaluation des risques écologiques est l'échelle d'évaluation qui complique fortement l'interprétation et la validité des résultats.

En effet :

- certains phénomènes à l'échelle de l'écosystème n'ont pas d'équivalent humain (exemple de l'eutrophisation)
- les structures des écosystèmes sont variées et non reproductibles
- l'évolution d'un écosystème est difficilement prévisible, les mécanismes d'adaptation aux changements, de récupération sont difficiles à comprendre
- les niveaux de protection sont différents, protection de l'individu dans le cas du risque sanitaire, protection de la structure et du fonctionnement de l'écosystème dans le cas du risque écologique
- certains produits ont été fabriqués spécifiquement pour leurs effets sur les espèces vivantes (pesticides par exemple) et sont donc caractérisés par un danger écologique plus que sanitaire
- étant donné le grand nombre d'espèces animales, la probabilité de trouver une ou plusieurs espèces plus sensibles que l'homme à un polluant donné n'est pas négligeable
- les espèces sont exposées aux polluants par des voies qui leur sont propres (par exemple le nettoyage du pelage) et différentes de l'homme en général
- les espèces animales peuvent plus difficilement que l'homme éviter certains dangers en changeant par exemple de nourriture ou d'habitat
-

III.4. LES INDICATEURS

III.4.1. SYNTHÈSE DE LA MÉTHODOLOGIE

A Description de la méthode

Un indicateur est un signe ou un signal utilisé pour représenter des événements ou des systèmes complexes. Toujours défini au moyen de règles et de conventions, il fournit une interprétation empirique de la réalité, à un coût moindre (données facilement accessibles) qu'avec un système de mesures, de modélisation et d'interprétation. Généralement, les indicateurs sont utilisés pour suivre l'évolution d'un système dans le temps ou pour comparer plusieurs systèmes. Il en découle deux caractéristiques essentielles :

- être suivi de façon récurrente dans le temps,
- être calculable d'une manière identique pour les systèmes que l'on compare.

Concrètement, un indicateur peut être une variable (par exemple, la quantité totale de CO₂ émis annuellement par l'industrie), ou une fonction de variables (par exemple, le rapport entre la quantité de déchets recyclés et la quantité totale de déchets produits par les ménages). Le plus souvent quantitatifs, les indicateurs peuvent aussi faire intervenir des variables qualitatives (par exemple, le degré de satisfaction de la population par rapport au niveau de bruit).

Un indicateur traduit donc un ensemble de données en une information succincte afin que celle-ci puisse être comprise et intégrée dans l'activité de l'utilisateur pour lequel l'indicateur a été conçu. Cette utilisation peut soit se limiter à fournir de l'information, soit (le plus souvent) aider à la prise de décision. La diversité des utilisateurs possibles, allant des experts au grand public en passant par les décideurs politiques et économiques, appellerait idéalement à concevoir des indicateurs qui répondent spécifiquement aux besoins et capacités de chacun d'entre eux. En tout état de cause, chaque système d'indicateur utilisé, outre sa description précise et ses limites de validité, doit être accompagné d'une présentation des valeurs et conventions implicites qui ont guidé sa construction.

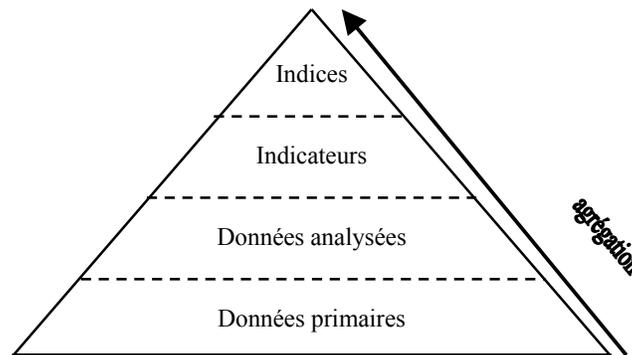
Les indicateurs visent à réduire le nombre de composantes nécessaires pour rendre compte d'une condition ou d'une situation, mais cette simplification peut s'opérer jusqu'à des degrés divers. C'est ainsi que l'on peut distinguer différents niveaux d'agrégation des données constituant les indicateurs.

L'exemple le plus connu d'indicateur agrégé est le produit intérieur brut (PIB) d'un pays. Le PIB représente une agrégation "classique" en ce sens qu'il n'agrège que des variables de nature identique (des Euros) et qu'il ne traite que d'une dimension unique (la dimension économique).

D'autres indicateurs agrégés, en revanche, combinent des données ou des indicateurs de natures et de dimensions différentes. On les appelle parfois « *indicateurs composites* ». Ainsi, les indices écologiques agrègent différentes données relatives aux conditions de vie des espèces et permettent d'évaluer la pollution d'un milieu en suivant l'évolution du nombre d'espèces qui y vivent. Par exemple⁵³ : l'Indice Biologique des Diatomées (IBD) est calculé à partir de diatomées (algues microscopiques pourvues d'un squelette en silice) et permet l'évaluation de la qualité générale de l'eau de tous les cours d'eau après étude des communautés de diatomées fixées. Cet indicateur permet de prendre en compte des informations de natures différentes, utilisant des unités hétérogènes.

⁵³ D'autres exemples d'indicateurs sont repris au point III.4.5 : « Pour en savoir plus ».

Les données et les indicateurs peuvent donc être représentés par une structure pyramidale au sommet



de laquelle on trouve des indicateurs très agrégés, qui sont parfois appelés "indices" (index).

On constate qu'un degré supérieur d'aggrégation facilite la lecture synthétique d'un phénomène, mais fait perdre des données analytiques. Une solution pragmatique à ce problème est sans doute de présenter simultanément des indicateurs ou indices agrégés (avantage pour la communication) et des données ou indicateurs détaillés (avantage pour l'analyse scientifique).

Signalons que les différents indicateurs sont susceptibles d'être mesurés à des niveaux différents de précision, d'exactitude, d'échelle spatio-temporelle et dans des unités de mesure très hétérogènes. Ceci complique en général le processus d'aggrégation des mesures en un indice synthétique.

B Enjeux environnementaux pris en compte

Des indicateurs peuvent être construits pour assurer le suivi des décisions prises à n'importe quel niveau de la chaîne d'effet (évolution d'un flux élémentaire, suivi des quantités de déchets ménagers, suivi du nombre d'espèces protégées, suivi du pH d'un sol, suivi de la teneur en nitrates dans les eaux de surface,...) à condition de respecter les principes suivants :

- **La pertinence** désigne le niveau d'adéquation de l'indicateur ou du système d'indicateur au référent qui peut être un concept mais aussi une situation ou un objectif. L'indicateur doit répondre au besoin de mesure, avoir une signification dans le contexte d'étude ou de gestion, il doit vouloir dire quelque chose pour ses utilisateurs et être utilisé dans ce contexte
- **La fidélité** désigne l'adéquation de la mesure de l'indicateur à celle du référent. Par exemple, lorsque celui-ci est intrinsèquement quantitatif et continu, un indicateur qui ne prend que deux ou trois valeurs ne pourra guère être considéré comme fidèle
- **La sensibilité** désigne l'importance relative de la variation de l'indicateur par rapport à celle du référent. Un indicateur sensible réagit immédiatement à un changement de son référent. En fait, la sensibilité dépend à la fois de la pertinence et de la fidélité. Si l'indicateur est bien le reflet de ce qu'il mesure et s'il le mesure fidèlement, il y a de fortes chances pour qu'il soit également sensible
- **La spécificité** désigne son apport spécifique à la connaissance du référent par rapport aux autres indicateurs qui s'y rapportent. Un indicateur sera d'autant plus spécifique qu'il sera faiblement corrélé avec les autres indicateurs utilisés pour mesurer le référent. Il importe donc d'éviter les redondances de traduction des phénomènes observés dans les indicateurs.

Pour déterminer la valeur d'un indicateur, deux types de mesure existent :

- **La mesure directe** : via des appareils de mesures ou des modèles mathématiques
 - ⇒ exemple : suivi des rejets de nitrates et de phosphates dans l'eau
- **La mesure indirecte** : qui consiste à rechercher une valeur plus facilement accessible en lien direct avec le référent.
 - ⇒ exemple : la qualité de l'eau douce peut être mesurée via le taux de raccordement aux stations d'épuration

Les mesures peuvent se faire en continu ou sur base d'un échantillon représentatif.

Les indicateurs sont particulièrement intéressants pour prendre en compte des enjeux environnementaux difficilement quantifiables comme les odeurs ou assurer le suivi des enjeux au niveau local ou d'une population spécifique.

III.4.2. PRINCIPAUX DOMAINES D'APPLICATION

Si un indicateur présente des données intéressantes pour la connaissance et la représentation des phénomènes, sa vocation principale est toutefois l'aide à la décision. Il existe aujourd'hui un grand nombre d'indicateurs fiables, et s'il est utile d'améliorer encore ces informations, il est certainement possible aujourd'hui d'utiliser les indicateurs (et leurs analyses) disponibles pour améliorer les décisions et en assurer le suivi. Ceci est particulièrement vrai dans un processus interne d'identification des problèmes environnementaux et de suivi des améliorations proposées. Même si, souvent, le décideur " sait " déjà, perçoit une situation ou un problème, un bon système d'information est nécessaire, non seulement pour confirmer de façon structurée et objective ses impressions par des chiffres, mais aussi pour lui permettre d'affiner sa connaissance des paramètres ou de fouiller les résultats. En pratique les valeurs des indicateurs peuvent être comparées :

- **dans le temps** : pour assurer un suivi interne
- **à des normes réglementaires** : pour s'assurer du respect de la législation en vigueur
- **à des valeurs correspondant à des bonnes pratiques ou à des activités similaires** : pour pouvoir se positionner et éventuellement communiquer sur les points forts.

III.4.3. LIMITES DE LA METHODE

Les indicateurs permettent de simplifier la collecte et l'analyse de données de suivi en les réduisant à un nombre limité d'informations faciles à collecter et facilement compréhensibles. Cet avantage, tant d'un point de vue temps et coût de collecte de l'information que du point de vue "communication" constitue en même temps leur faiblesse car l'interprétation des indicateurs est souvent difficile et variable d'une situation à l'autre. Ces difficultés se renforcent d'ailleurs avec le degré d'agrégation de ceux-ci.

Un indicateur ne donne qu'une vue partielle, réductrice d'un phénomène plus large (ceci est vrai pour toutes les méthodes d'évaluation mais est beaucoup plus marqué dans le cas des indicateurs). L'évolution du PIB ne représente pas pour autant le bien-être, bien que le PIB soit beaucoup plus facile à manier et à comparer que le bien-être, et qu'il soit souvent utilisé en ce sens. Il en va de même pour des indicateurs sociaux et environnementaux déterminés.

Mal interprétés, les indicateurs peuvent donner une image trompeuse de la situation et n'informer que partiellement. Un bel exemple des limites des indicateurs est rencontré dans les rapports environnementaux ou de développement durable des entreprises.

Celles-ci présentent sous forme de tableaux et de graphiques l'évolution d'une série d'indicateurs environnementaux sans préciser :

- l'importance relative de chaque indicateur par rapport aux autres : le fait d'avoir 9 indicateurs "au vert" contre 1 "au rouge" ne signifie pas nécessairement que l'entreprise a un impact négligeable sur l'environnement.
- les enjeux environnementaux associés : même si les émissions de CO₂ ont diminué de 10% en 1 an, l'entreprise continue à contribuer plus ou moins significativement à l'augmentation de l'effet de serre. La diminution peut aussi être compensée par une augmentation de l'émission d'autres gaz à effet de serre (méthane) ou par le transfert d'émissions (utilisation d'électricité, avec émission délocalisée, plutôt que de combustible fossile)
- les limites des systèmes pris en compte : résultats pour tous les sites d'un groupe sans tenir compte localement de la sensibilité du milieu récepteur)

De plus, le choix des indicateurs ne se base pas souvent sur des critères objectifs mais plutôt sur des arguments comme l'image, la communication des efforts réalisés, la facilité de collecte des données de calcul de la valeur des indicateurs... Ce dernier point n'est pas spécifique à la méthode des indicateurs et dépend très fort d'un commanditaire à l'autre.

III.4.4. EXEMPLES DE GROUPES D'INDICATEURS

- Indicateurs de l'environnement de l'[OCDE](#)
- [Indicateurs du GRI](#) : Les lignes directrices reprennent des sets d'indicateurs pour l'environnement, l'économique et le social.
- [Indice Biologique Global Normalisé \(IBGN\)](#) : Norme NF T90-350 : note de 0 à 20 attribuée au niveau d'une station de mesure après étude du peuplement d'invertébrés aquatiques des cours d'eau. La valeur dépend de la qualité du milieu physique et de la qualité de l'eau. Cette méthode n'est valable que pour les cours d'eau. Cet indice est calculé à partir d'invertébrés aquatiques (larves d'insectes, mollusques, vers, crustacés, ..., de taille supérieure à 0,5 mm). Il permet l'évaluation de la qualité de l'eau (matières organiques essentiellement) et des habitats des petits cours d'eau peu profonds.
- [Indice ATMO](#) : Indicateur global de la qualité de l'air. Il est calculé pour les agglomérations de plus de 50.000 habitants (zones dites "de pollution homogène"). Cet indice synthétique est calculé à partir de la concentration dans l'air ambiant de quatre polluants surveillés en continu: le NO₂, le SO₂, les poussières d'origine industrielle et automobile et l'ozone (d'origine photochimique). Peuvent être également mesurés : le plomb, les composés organiques volatils.
- [Indicateur biologique](#) : Désigne une espèce animale ou végétale dont la présence ou l'absence révèle certaines caractéristiques de l'environnement. Deux groupes de plantes peuvent être utilisés : les bio-indicateurs et les bio-accumulateurs.
 - Les [plantes bio-indicatrices](#): sont très sensibles aux polluants de l'air. Elles sont identifiées à partir de tables de différentes sensibilités aux polluants de l'air. L'existence de symptômes spécifiques visibles sur la feuille est généralement utilisé comme marqueur mais les modifications morphologiques peuvent aussi être observées. L'utilisation de bio-indicateurs associée à l'observation de la végétation a l'avantage d'être rapide, facile et bon marché ; mais le désavantage est que d'autres stress (biotiques ou abiotiques) peuvent être la cause de symptômes identiques à ceux causés par un polluant. Le degré de dommage causé (nécroses) dépend de la durée d'exposition, des concentrations du polluant, de la sensibilité de la plante, des conditions environnementales et principalement de la toxicité du polluant. Toutes les plantes n'ont pas une même capacité à réagir à un polluant donné ; aussi une plante peut

être un bio-indicateur très bon pour HF et O₃ (ozone), moins bon pour le SO₂, et sans réaction face à des NO_x (oxydes d'azote).

- Les plantes bio-accumulatrices sont des plantes résistantes à la pollution. Elles peuvent accumuler des polluants (métaux lourds, SO₂, pesticides, etc) sans qu'il y ait de dommages causés sur leur physiologie et leur morphologie. L'analyse de la végétation permet de quantifier et d'identifier les polluants accumulés ; le désavantage réside alors dans le coût de ces analyses.

Exemples de plantes utilisées communément :

- Les lichens sont de très bons bio-indicateurs du SO₂, mais ils peuvent aussi servir de bio-accumulateurs pour les NO_x et le SO₂ quand ces polluants sont présents en petite quantité.
 - Le tabac et le trèfle sont de bons bio-indicateurs pour l'ozone et le PAN (PeroxyAcetyl Nitrate).
 - les tulipes, les glaïeuls et le millepertuis sont des bio-indicateurs de HF.
 - le ray-grass et les arbres d'alignements en ville sont des bio-accumulateurs des métaux lourds et des poussières.
 - le chou et les pins sont des bio-accumulateurs des COV (Composés Organiques Volatils).
 - les mousses sont des bio-accumulateurs des métaux lourds.
- Indice Poisson (IP) : Désigne un indice calculé à partir d'inventaires de poissons réalisés par pêche électrique. Il permet l'évaluation de la qualité de l'eau et des habitats (dont l'hydrologie). Il est applicable à l'ensemble des cours d'eau non artificialisés.

III.4.5. POUR EN SAVOIR PLUS

- Indicateurs de l'environnement de l'OCDE : <http://www.oecd.org/dataoecd/33/0/31558903.pdf>
- Indicateurs du GRI : <http://www.globalreporting.org/guidelines/2002.asp>

Le Global Reporting Initiative(GRI) est une institution indépendante regroupant différentes parties prenantes dont la mission est développer et disséminer des lignes directrices pour la rédaction de rapport de développement durable. Le GRI est composé de représentants du monde des affaires, de l'environnement, des droits de l'homme, d'organisations du travail à travers le monde. Les indicateurs relatifs à l'environnement repris par le GRI sont repris à la page 50 des Guidelines 2002 (cf. lien Internet).

III.5. EXEMPLE D'INDICATEUR : L'EMPREINTE ÉCOLOGIQUE

Note préliminaire : L'empreinte écologique est une méthode d'évaluation de la catégorie des indicateurs. Sa spécificité et l'intérêt grandissant des autorités publiques et des entreprises pour cette méthode (essentiellement pour des aspects de communication) nous ont amenés à la présenter en particulier. Les commentaires du chapitre sur les indicateurs restent évidemment d'application.

III.5.1. SYNTHÈSE DE LA MÉTHODOLOGIE

A Description de la méthode

L'empreinte écologique est un indicateur permettant d'évaluer l'impact de la consommation de l'homme en terme de superficie de terre. Exprimée en hectares par année et par personne ou nation, l'empreinte écologique est la portion de la surface terrestre nécessaire pour assurer notre subsistance et absorber les déchets que nous produisons. Les calculs de l'empreinte écologique prennent notamment en compte la quantité de matière organique requise pour fixer le carbone que nous rejetons dans l'atmosphère.

L'expression des résultats en "nombre de planètes consommées" ou en "hectares" en font un outil facilement compréhensible par le grand public et très porteur au niveau de la communication. C'est là son originalité et sa force.

Le calcul de l'empreinte écologique répartit la consommation en 4 catégories :

1. alimentation
2. logement
3. transport
4. biens de consommations et services.

Les sols (superficies) sont classés en 10 catégories :

- b) sol approprié par l'utilisation des combustibles fossiles,
- c) sol dégradé (construit),
- d) sol construit réversible (jardins),
- e) sol cultivé,
- f) pâturages,
- g) forêts cultivées,
- h) forêts dites vierges,
- i) sol à faible productivité (déserts, couches glaciaires),
- j) mer à productivité élevée,
- k) mer à faible productivité.

Les sols étant de natures très différentes, chaque surface est pondérée en fonction de sa productivité. Ainsi un hectare situé en Beauce occupera une superficie théorique plus importante qu'un hectare situé en Ardèche où le sol est moins riche.

Une fois les principales consommations et les catégories d'utilisation définies, on établit le lien entre chaque catégorie de consommation.

Par exemple, la catégorie « logement » comprend la superficie sur laquelle est construite la maison, mais également celle nécessaire pour faire pousser le bois de construction ou encore celle nécessaire pour produire l'énergie de chauffage.

Exemple du calcul de l'empreinte écologique :

Soit,

- La consommation d'essence moyenne d'une voiture : 10 l/100 km
- La consommation d'énergie supplémentaire nécessaire pour construire la voiture et entretenir les routes : + 45%
- Le pouvoir calorifique de l'essence : 0,035 GJ/litre
- L'énergie emmagasinée annuellement dans 1 hectare de forêt : 71 GJ de combustibles fossiles

L'empreinte écologique d'un automobiliste faisant 10 km aller/retour pour aller au travail est de :

$$\frac{1,45 * 10l * 0,035GJ / l * 10km / jour * 220 jours}{100km * 71GJ / ha} = 0,16 \text{ ha/an ou } 1.600 \text{ m}^2/\text{an}$$

A titre d'information, l'empreinte moyenne d'un terrien est de 2,8 ha/an avec de grandes disparités en fonction des pays. L'empreinte d'un indien est de 0,8 ha, celle d'un français de 5,2 ha et celle d'un américain de 10,3 ha. Si l'on ramène ces chiffres à la superficie disponible, on constate que l'homme utilise 120 à 125% des capacités de la biosphère.

B Enjeux environnementaux pris en compte

L'empreinte écologique est un concept centré sur l'être humain qui concerne uniquement les besoins de l'homme pour vivre (en convertissant en superficie, l'énergie et les matières requises⁵⁴ par une économie). Ces besoins sont convertis en une unité de superficie commune pour faciliter la communication et les comparaisons de systèmes.

Les autres enjeux environnementaux centrés sur la faune, la flore ou la dégradation des écosystèmes ne sont pas pris en compte. De même, les enjeux centrés sur l'homme autres que ceux du thème : "Utilisation des ressources naturelles" (cf. point II.4) ne sont pas pris en compte.

Dans l'exemple de l'automobiliste, les enjeux suivants, qu'ils soient directs (émissions de la voiture) ou indirects (émissions tout au long du cycle de vie), ne sont pas pris en compte :

- la toxicité humaine des polluants : benzène, CO,...
- le smog photochimique : COVNM (Composés Organiques Volatils, hors méthane)
- l'augmentation de l'effet de serre : CO₂
- l'acidification de l'air : NO_x et SO_x
- la pollution des sols et de l'eau par les hydrocarbures
- ...

⁵⁴ En dehors de la consommation d'eau potable qui n'est pas prise en compte.

III.5.2. PRINCIPAUX DOMAINES D'APPLICATION

Le calcul de l'empreinte écologique peut s'appliquer à toutes les activités humaines consommatrices de ressources naturelles, que ce soit à l'échelle d'une Région ou d'un pays ou à l'échelle plus locale au niveau d'une entreprise ou d'un ménage.

Le concept d'empreinte écologique oscille entre simplicité et complexité. L'idée de traduire en terme de superficie l'impact des activités humaines sur la biosphère peut être aisément comprise par le plus grand nombre.

La principale utilité de l'empreinte écologique est de sensibiliser chacun de nous au danger que nous faisons peser sur l'avenir de la planète de par notre mode de consommation actuel. Comme il s'agit d'un indicateur à la fois synthétique et assez parlant, il trouve certainement sa place dans la panoplie des instruments d'une politique environnementale comme outil de communication. Le cas échéant, si on ne s'intéresse qu'aux consommations de ressources naturelles, cet indicateur peut être utilisé comme outil de suivi. Cet outil est d'ailleurs de plus en plus utilisé par les autorités publiques ou les associations de défense de l'environnement pour informer et sensibiliser le grand public à un mode de consommation plus durable. Il faut toutefois garder à l'esprit que cet « indicateur » ne considère qu'une faible partie des enjeux environnementaux associés à une activité.

Signalons également que l'empreinte écologique est souvent associée au concept de développement durable alors que cet indicateur ne prend pas en compte les aspects sociaux et économiques et ne considère qu'une partie restreinte des enjeux environnementaux.

III.5.3. LIMITES DE LA MÉTHODE

Une série de critiques et les réponses apportées sont reprises sur le site internet : <http://www.bestfootforward.com/footcrit.html>.

La limite principale est évidemment, le **nombre très limité d'impacts** environnementaux pris en compte. Cet indicateur est basé uniquement sur la consommation de ressources (y compris le sol). Par ailleurs, le mode de calcul est également discutables :

- Les nombreuses hypothèses et le caractère très approximatif des données à la base du calcul de l'empreinte écologique (traduction des consommations en hectares de terre de différents types) sont tels qu'il est à peu près impossible qu'elle offre un reflet fidèle de la réalité qu'elle prétend cerner. En fait, la signification de l'empreinte écologique est probablement à peu près nulle ce qui rend illusoire toute comparaison internationale sur cette base. En revanche, l'évolution annuelle ou quinquennale de l'indicateur a beaucoup plus de chances de refléter plus ou moins fidèlement l'évolution de la situation globale en matière de consommation de ressources à l'échelle planétaire
- Les outils de calcul de l'empreinte écologique (disponibles en grande partie sur Internet) montrent très rarement les hypothèses et les méthodes de calculs. Ce manque de transparence rend difficile la comparaison des résultats entre eux.

III.5.4. POUR EN SAVOIR PLUS

- Empreinte écologique de la France (rapport du WWF) : http://www.wwf.fr/empreinte_ecologique/EmpreinteFrance4p.pdf
- Un des sites les plus complet sur le sujet : <http://www.bestfootforward.com/>
- Exemple de calcul de l'empreinte écologique : <http://www.agir21.org/flash/empreinteecoweb/loadcheckplugin.html>

IV. CONCLUSIONS

Conclusion 1 : Les enjeux environnementaux font partie d'une chaîne d'effets. Les activités et procédés sont souvent perçus, à tort, comme des enjeux environnementaux

En matière de perception des enjeux environnementaux, la plupart des personnes ont des difficultés à identifier :

- un **lien entre un flux de matière** ou une activité humaine (exemple "les déchets", "la consommation d'énergie", "l'industrie",...) **et les flux élémentaires** engendrés par le ou les procédé(s) de traitement ou d'utilisation de cette matière,
- **les liens entre les flux élémentaires et les conséquences finales** pour l'homme, la faune, la flore et les bâtiments (que l'on peut même encore regrouper en conséquences finales pour l'homme uniquement).

Face à ces difficultés, chacun appréhende l'environnement en fonction de ses préoccupations directes et à une échelle temporelle et géographique spécifique. Les riverains d'un incinérateur de déchets vont par exemple se préoccuper des effets sur la santé humaine (préoccupations directes) liés aux émissions directes (échelle temporelle) d'un type de polluant (préoccupations directes) à une échelle locale (échelle géographique) sans prendre en compte les autres enjeux environnementaux, plus globaux, liés à la gestion des déchets (ressources, effet de serre). D'une manière générale, les interviews ont montré que chacun ne perçoit et n'est sensible qu'à un nombre limité de problèmes environnementaux, essentiellement par manque de connaissance des autres problèmes. L'intérêt des cartes de perception environnementale est de permettre aux décideurs (publics ou privés), aux riverains ou aux associations de défense de l'environnement de situer l'enjeu environnemental qui les intéresse au sein d'une problématique plus globale. Cette prise de conscience de la nature hétérogène et interdépendante de l'environnement permet de se poser les bonnes questions et, le cas échéant, de relativiser l'importance des enjeux environnementaux.

Conclusion 2 : La nature complexe des enjeux environnementaux encourage (à tort) le cloisonnement des actions de préservation de l'environnement

La mise en évidence de la nature interdépendante de l'environnement désempare le décideur au regard des leviers d'actions dont il dispose. Un projet doit régler des problématiques locales (trajet local des camions, bruit, odeurs) dans un cadre régional/national (plan des déchets) avec un contexte international (Kyoto). Ce sentiment est ressorti très clairement des interviews lorsque, après avoir pris conscience des liens au travers l'analyse des cartes, chaque interlocuteur s'est très vite recentré sur l'enjeu qui le concerne et qu'il maîtrise.

Même s'il existe effectivement des contraintes de temps et de moyens pour agir efficacement, l'optimisation des ressources disponibles (via une identification des enjeux environnementaux clés) est certainement une meilleure solution que de continuer à cloisonner nos efforts. Si cette étude permet une prise de conscience de la nécessité d'optimiser les efforts, la hiérarchisation des enjeux environnementaux doit se faire au cas par cas en tenant compte :

- ⇒ **de la logique décisionnelle :**
 - Composante développement durable (gestion inter-générationnelle)
 - Composante individuelle (réduire les impacts les mieux connus et contrôlés)
 - Composante coût-efficacité (réduire les impacts les plus importants dans le budget disponible)
 - Composante gestion des incertitudes (application du principe de précaution)

- ⇒ **de la contribution relative** de l'activité aux enjeux environnementaux identifiés
- ⇒ **des moyens disponibles**

Conclusion 3 : Le choix des méthodes d'évaluation environnementale dépend des objectifs fixés par l'évaluateur et des enjeux environnementaux à évaluer.

De manière générale, les principales caractéristiques de chaque méthode pouvant orienter le choix de l'évaluateur sont :

⇒ **Analyse du Cycle de Vie (ACV) :**

Avantages :

- quantification d'un grand nombre d'enjeux environnementaux à l'échelle régionale ou de la planète (ce qui nécessite souvent un grand nombre de données)
- prise en compte de l'ensemble du cycle de vie de manière à tenir compte des transferts de pollution
- méthode standardisée selon des normes ISO,

Limites :

- difficulté d'appréhender les effets au niveau local sur une population ou un écosystème déterminé,
- connaissances spécifiques requises pour l'analyse et l'interprétation des résultats.

⇒ **Evaluation du Risque Sanitaire (ERS) et Evaluation des Risques pour les Écosystèmes :**

Avantages :

- rendre transparents, donc opposables et perfectibles, des évaluations dont les résultats ne doivent plus être refusés au nom de l'incertitude scientifique. (d'un point de vue effet sur la santé humaine ou effet sur les écosystèmes).

Limites :

- prise en compte uniquement des effets des polluants émis dans l'air, l'eau et le sol sur la santé humaine ou les écosystèmes à l'échelle locale,
- lacunes scientifiques sur l'effet de nombreuses substances chimiques,
- connaissances spécifiques requises pour l'analyse et l'interprétation des résultats.

⇒ **Indicateurs :**

Avantages :

- potentiellement, tous les enjeux environnementaux peuvent être pris en compte et ce, à n'importe quelle échelle (locale → globale). Cependant, chaque indicateur n'est lié qu'à une étape de la chaîne des effets (exemple, le suivi de la concentration de CFC permet d'avoir une indication sur l'état de la couche d'ozone mais pas de quantifier l'effet sur la santé humaine),
- très bon outil de suivi des performances spécifiques et très bon outil de communication,

Limites :

- difficulté de comparer des résultats par manque de standardisation des méthodes de calcul des indicateurs,
- par définition, il s'agit d'une vue partielle, réductrice d'un phénomène plus large
- il y a souvent des redondances dans les effets.

⇒ **Empreinte écologique :**

Avantages :

- très bon outil de communication.
- présentation des résultats sous la forme d'un score unique ce qui facilite les comparaisons et la communication.

Limites :

- difficulté d'appréhender les effets au niveau local sur une population ou un écosystème déterminé,
- prise en compte uniquement de l'utilisation des ressources nécessaires à l'homme pour vivre (exprimé en énergie et en matière première requise), donc à l'échelle de la planète ; la majorité des enjeux environnementaux sont donc ignorés.
- les nombreuses hypothèses et le caractère très approximatif des données à la base du calcul de l'empreinte écologique (traduction des consommations en hectares de terre de différents types) sont tels qu'il est à peu près impossible qu'elle offre un reflet fidèle de la réalité.

Les méthodes d'évaluation ne sont donc pas opposables mais au contraire complémentaires. A titre d'exemple, les résultats d'une ERS peuvent être intégrés aux conclusions d'une ACV qui, bien souvent, néglige par manque de méthodologie standardisée les effets locaux et en particulier ceux sur la santé humaine. De même, l'idée de présenter les résultats sous la forme d'un score unique et dans une unité facilement compréhensible (l'hectare dans le cas de l'empreinte écologique) peut être appliquée à la méthode des ACV. Le Tableau 9 (page suivante) reprend les enjeux environnementaux pris en compte par chaque méthode et leurs principaux avantages et limites.

La Figure 9 présente de manière générique les champs pris en compte par les différentes méthodes d'évaluation.

Sur cette carte, on peut observer :

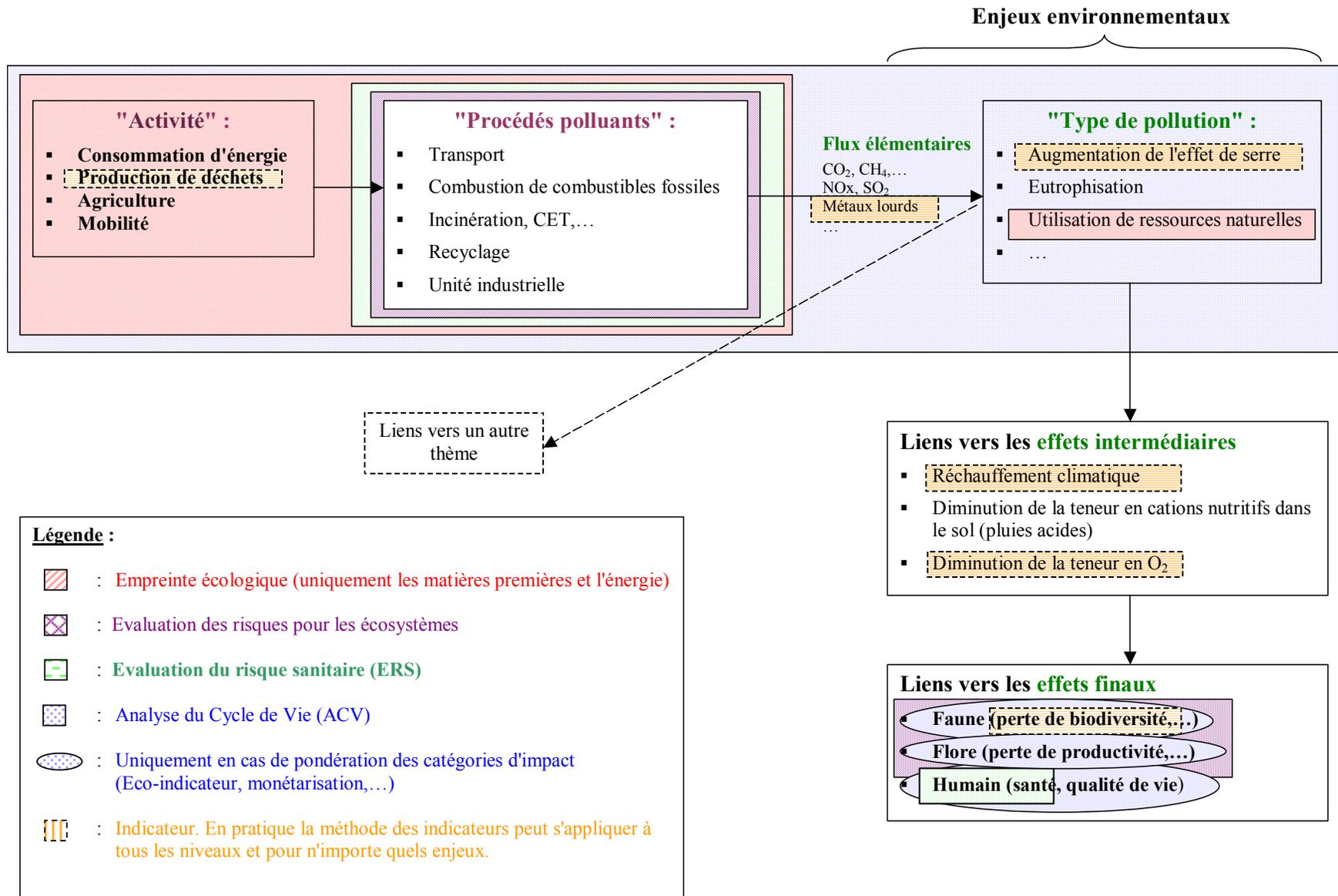
- Encadré bleu : l'ACV part d'une activité humaine, détermine les procédés polluants associés, inventorie et quantifie les flux élémentaires émis puis les classe et les rapporte à l'unité du type de pollution (exemple : g éq. CO₂ pour l'effet de serre)
- Ovale bleu : l'ACV « classique » ne quantifie pas les effets finaux sauf via des méthodologies complémentaires comme Eco-indicateur 99, Eco-points ou la monétarisation
- Encadré orange : les indicateurs peuvent être appliqués à tous les niveaux et pour n'importe quels enjeux. Les pointillés montrent qu'il s'agit d'exemples.
- Encadré vert : l'ERS ne s'intéresse qu'aux effets finaux sur la santé humaine d'un procédé polluant à l'échelle locale
- Encadré rouge : l'empreinte écologique part d'une activité humaine, détermine les procédés polluants mais ne quantifie que l'utilisation de ressources naturelles associées.

Tableau 9 : Présentation enjeux environnementaux pris en compte par chaque méthode et leurs principaux avantages et limites.

	Enjeux pris en compte	Enjeux pas pris en compte	Avantages	Limites	Echelle prise en compte	Exemple de résultats
Analyse du Cycle de Vie (ACV)	<ul style="list-style-type: none"> - Augmentation de l'effet de serre - Destruction de la couche d'ozone - Acidification - Eutrophisation - Smog photochimique - Toxicité dans le sol - Toxicité dans l'eau - Santé humaine (partiellement) - Prélèvement des ressources - Utilisation de l'espace 	<p>De manière générale, les effets finaux liés aux catégories d'impacts ne sont pas évalués (exemple : perte de biodiversité, propagation de maladies tropicales, perte de productivité,...)</p> <p>Les effets sur la santé humaine sont pris en compte au niveau de la quantification des substances polluantes. L'ACV ne quantifie pas les effets .</p> <p>Les enjeux locaux ou liés à une pollution ponctuelle sont rarement pris en compte (odeur, bruit, toxicité direct d'un polluant, perturbation directe d'un écosystème, pollution accidentelle...)</p>	<p>Prise en compte de l'ensemble du cycle de vie. L'approche ACV contribue ainsi à éviter des prises de décision qui ne se contenteraient que de déplacer le dommage environnemental d'un stade à l'autre.</p> <p>Nombreux enjeux environnementaux pris en compte</p> <p>Méthodologie standardisée (normes ISO 14040-14043)</p>	<p>Connaissances spécifiques requises de la méthodologie pour l'analyse et l'interprétation des résultats.</p> <p>Difficulté de généraliser les résultats.</p> <p>Difficulté d'accès aux données (partiellement résolu grâce à la standardisation de BD)</p>	<p>Prise en compte des effets à l'échelle régionale ou mondiale tout au long du cycle de vie. Les effets à l'échelle locale sont difficilement pris en compte mais des méthodologies complémentaires sont en cours de développement.</p>	<p>Les résultats sont présentés par catégorie d'impact (cf. tableau 8)</p> <p>Exemple fictif : L'impact environnemental d'un téléviseur tout au long de son cycle de vie est responsable des impacts environnementaux suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Augmentation de l'effet de serre : 250 g equ. CO2 - Augmentation de l'acidification : 34 g equ H+ - Eutrophisation : 89 g equ PO4 - <p>En cas de pondération des catégories d'impacts, les résultats sont présentés :</p> <ul style="list-style-type: none"> - en euro : pour la monétarisation - en DALYS, PDF ou MJ : pour Eco-indicateur 99 - en Eco-points
Evaluation du Risque Sanitaire (ERS)	<p>Effets des polluants émis dans l'air, l'eau et le sol sur la santé humaine des habitants voisins d'une installation</p>	<p>Tous les enjeux environnementaux qui n'affectent pas la santé humaine.</p> <p>Les enjeux environnementaux affectant de manière indirecte la santé humaine :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Augmentation de l'effet de serre --> augmentation de l'intensité des phénomènes climatiques - Destruction de la couche d'ozone --> exposition aux UV solaires - Apparition de bruit --> gênes, fatigues, stress 	<p>Rendre transparents, donc opposables et perfectibles, des choix qui ne doivent pas être refusés au nom de l'incertitude scientifique.</p>	<p>L'ERS n'apporte des réponses que sur des pathologies liées à des substances polluantes pour lesquelles il existe des VTR. L'évaluation des risques sanitaires est une méthode qui fournit l'estimation la plus plausible du risque encouru par les individus ; elle permet de guider les décisions en situation d'incertitude. Il existe encore de nombreuses substances chimiques pour lesquelles on ne connaît pas l'effet sur la santé humaine. Ce qui rend impossible toute ERS.</p>	<p>Prise en compte des effets à l'échelle locale pour un site spécifique.</p>	<p>Polluants agissant <u>sans seuil</u> :</p> <p>Calcul de l'ERI : $ERu \times \text{dose moyenne journalière}$ (exemple un ERI de $3.55 \text{ E-}6$ pour le Cd signifie que le risque de mourir du cancer suite à l'immission de Cd est de 1 chance sur 300.000)</p> <p>Calcul de l'IS : $ERI \times \text{Population concernée}$ (exemple : pour une population de 94251 unités, le nombre de cas de cancer attendu suite à l'émission de Cd est de $3.55\text{e-}6 \times 94251$)</p> <p>Polluants <u>avec seuil</u> :</p> <p>Calcul du ratio RD : Valeurs d'immission/VTR (Un RD inférieur à 1 signifie que la population exposée a été théoriquement hors de danger)</p>

	Enjeux pris en compte	Enjeux pas pris en compte	Avantages	Limites	Echelle prise en compte	Exemple de résultats
Evaluation du Risque pour les écosystèmes	Effets des polluants émis dans l'air, l'eau et le sol sur les espèces ou les habitats naturels voisins d'une installation	Tous les enjeux environnementaux qui n'affectent pas les écosystèmes Les enjeux environnementaux affectant de manière indirecte les écosystèmes : - Augmentation de l'effet de serre - Destruction de la couche d'ozone - Augmentation de l'acidification de l'air - Eutrophisation - Utilisation de ressources naturelles - Augmentation de la teneur en aérosols - Smog photochimique	Rendre transparents, donc opposables et perfectibles, des choix qui ne doivent plus être refusés au nom de l'incertitude scientifique.	Comme pour l'ERS, une limite de cette méthode est la difficulté d'utiliser les résultats pour communiquer auprès du grand public. Les résultats étant présentés en terme d'augmentation de la probabilité qui ne se traduit pas directement en un effet visible sur la population. Une des différences les plus caractéristiques entre l'évaluation des risques sanitaires et l'évaluation des risques écologiques est l'échelle d'évaluation qui complique fortement l'interprétation et la validité des résultats (les structures des écosystèmes sont variées et difficilement reproductibles).	Prise en compte des effets à l'échelle locale pour un site spécifique.	On considère successivement deux niveaux d'évaluation du risque écologique : * Un niveau <u>qualitatif</u> dont le risque est calculé de la manière suivante : R=PEC/PNEC où PEC : concentration d'exposition prévisible PNEC : concentration probablement sans effet prévisible si R>1, on considère qu'il existe un risque pour l'écosystème si R<1, on considère qu'il n'existe pas de risque pour l'écosystème * Un niveau <u>quantitatif</u> qui permet de déterminer l'incertitude liée au risque à l'aide d'un raisonnement probabiliste
Indicateurs	Potentiellement, tous les enjeux environnementaux peuvent être pris en compte. Cependant, chaque indicateur n'est lié qu'à une étape de la chaîne des effets (exemple, le suivi de la concentration de CFC permet d'avoir une indication sur l'état de la couche d'ozone mais pas de quantifier l'effet sur la santé humaine).	En pratique, il est difficile de construire des indicateurs pour l'ensemble des enjeux environnementaux associés à une activité humaine. Le choix des indicateurs dépend des données disponibles et de choix personnels	Méthode <u>de suivi</u> des performances simple basée sur des données facilement disponibles. Possibilité de standardiser les indicateurs pour faciliter la comparaison	Interprétation des indicateurs souvent difficile et variable d'une situation à l'autre. Un indicateur ne donne qu'une vue partielle, réductrice d'un phénomène plus large. Il y a parfois des redondances. Mal interprétés, les indicateurs peuvent donner une image trompeuse de la situation et n'informer que partiellement le public	Variable selon les indicateurs retenus	Exemples : - suivi des émissions de GES/habitants - population raccordée à une STEP - indice ATMO : Indicateur global de la qualité de l'air
Empreinte écologique	Concept centré sur l'être humain qui concerne uniquement les besoins de l'homme pour vivre (exprimé en énergie et en matières premières consommées).	Tous les enjeux environnementaux autres que l'utilisation de ressources naturelles par l'homme (y compris la consommation d'eau potable)	Excellent outil de sensibilisation et de communication. Présentation des résultats sous la forme d'un score unique ce qui facilite les comparaisons.	Vue partielle des enjeux environnementaux associés à une activité humaine Hypothèses de calcul simples, voire simplistes	Prise en compte des effets à l'échelle mondiale pour un site spécifique ou une partie du cycle de vie d'une activité.	Les résultats sont présentés en hectare de surface terrestre pour un ensemble d'habitants ou par personne. Une expression plus didactique consiste à ramener les hectares en nombre de planètes nécessaires. Pour ce faire, il suffit de diviser le résultats par le nombre total d'hectares biologiquement productifs sur terre. (exemple : si tout le monde consommait comme la moyenne européenne, il faudrait 3,4 planètes pour subvenir aux besoins de la population.

Figure 9 : Carte de perception des enjeux environnementaux + méthode d'évaluation environnementale



V. BIBLIOGRAPHIE

1. AGENCE CANADIENNE DE DÉVELOPPEMENT INTERNATIONAL (Février 2002) "Matrice des enjeux environnementaux", 1p.
2. AGENCE EUROPEENNE DE L'ENVIRONNEMENT, (2003) "Aspects socio-politiques de l'environnement", présentation 39p.
3. BANQUE POPULAIRE DU HAUT-RHIN, (2005), "Etude comparée des empreintes écologiques de l'ancien et du nouveau siège social" présentation 20p.
4. BERTOLINI G. – CNRS- LASS Université de Lyon, (Juillet 2001) "Monétarisation des effets environnementaux, état de l'art et revue bibliographique", 73p.
5. BUREAU DE L'ÉVALUATION DE L'HYGIÈNE DU MILIEU. (Décembre 1999), "Guide canadien d'évaluation des incidences sur la santé - Volume 2", 78p.
6. COMMISSION DES COMMUNAUTES EUROPEENNES (Janvier 2001) COM (2001) 31 final "Communication de la Commission au Conseil, au Parlement Européen, au Comité Economique et Social et au Comité des Régions sur le sixième programme communautaire d'action pour l'environnement "Environnement 2010: notre avenir, notre choix". Proposition de décision du Parlement Européen et du Conseil établissant le programme d'action communautaire pour l'environnement pour la période 2001-2010", 90p.
7. COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES, COM(2001) 88 final, (Février 2001), "Stratégie pour la future politique dans le domaine des substances chimiques", 37p.
8. COMMISSION EUROPÉENNE (février 2002) "Opter pour un avenir plus vert. L'Union européenne et l'environnement", 32p.
9. DAVIES D.PHIL., Katherine - Ecosystems Consulting Inc. et SADLER, Barry - Institute of Environmental Assessment, pour le Ministre des Approvisionnements et Services - Canada, (Mai 1997) "Évaluation environnementale et santé humaine : perspectives, approches et orientations" "Document d'information pour l'étude internationale sur l'efficacité de l'évaluation environnementale", 56p.
10. DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT DE L'OCDE (2004) "Indicateurs clés d'environnement de l'OCDE"
11. EMPEREUR-BISSONNET, Pascal - Service des Etudes Médicales de EDF et de Gaz de France, "Evaluation des risques pour la santé humaine: méthodologie", 20p.
12. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. IRIS (Integrated Risk Information System). 20-1-2001. <http://www.epa.gov/iris>
13. FERGUSSON, Angus - Service météorologique du Canada (2001) "Appauvrissement de l'ozone et changement climatique : des problèmes liés"
14. GESTION DES SITES POLLUÉS - Version 0 - BRGM Editions – (Juin 2000) "Partie VII, L'évaluation détaillée des risques pour les écosystèmes", 7p.
15. GLORENNEC p, PEIGNER p, ZMIROU d, (2001), "Evaluation du risque sanitaire lié au fonctionnement de l'usine d'incinération d'ordures ménagères d'angers. Etude de faisabilité et protocole de l'évaluation des risques sanitaires. cire ouest rennes.

16. HANSEN, James E., (May 2001), "Statement of Dr. James E. Hansen, Head NASA Goddard Institute for Space Studies, before the Committee on Commerce, Science and Transportation United States Senate", 22p.
17. HANSEN James E - NASA Goddard Institute for Space Studies, and Columbia University Earth Institute (June 2003), "Can we defuse The Global Warming Time Bomb?" (Edited presentation of James Hansen to the Council on Environmental Quality). 32p.
18. INRETS, Laboratoire Transports et Environnement (LTE), (Juillet 2003), "Projet de recherche fédérateur INRETS - Prospective et indicateurs des impacts des transports sur l'environnement.", 6p.
19. INSTITUT LILLOIS D'INGÉNIÉRIE DE LA SANTÉ (Mars 2005) "Méthodes d'évaluation des risques environnementaux et risque acceptable : Etats des lieux, étude comparative – Rapport de phase 1 : Synthèse bibliographique, Volume 1/2 et Volume 2/2", 144p. et 175p.
20. INSTITUT LILLOIS D'INGÉNIÉRIE DE LA SANTÉ (Janvier 2005) "Méthodes d'évaluation des risques environnementaux et risque acceptable : État des lieux, étude comparative - Rapport de phase 1 : Synthèse bibliographique", 133p.
21. INVS, (2000) "Guide pour l'analyse du volet sanitaire des études d'impact", 15p.
22. INVS (2000) "Guide pour la conduite à tenir lors d'une demande locale d'investigations sanitaires autour d'un incinérateur d'ordures ménagères", 104p.
23. IPCC – Working Group I (2001) Climate Change 2001: The Scientific Basis. 785p.
24. LALIK, Geneviève (ATTAC 45), "L'empreinte écologique"
25. MEGIE G., (1989), Ozone, l'équilibre rompu, Presses du CNRS.
26. NATURE, vol 433, (January 2005), www.nature.com/nature, "Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases", 4p.
27. OBSERVATOIRE DES PME (France), (Octobre 2003) "Les PME et l'Environnement : enjeux et opportunités ", 130p.
28. PROGRAMME DES NATIONS UNIES POUR L'ENVIRONNEMENT (1999) "L'Avenir de l'Environnement Mondial", 20p.
29. RAINELLI, Pierre – INRA- unité d'économie et sociologie de Rennes- (Octobre 1996), "Pollution des sols. Problèmes économiques", 14p.
30. RE.CO.R.D., ROUHAN, A. – Réseau Santé Déchets et STRASSER, F. – ADIT (Décembre 2004) Rapport final sur "Etat de l'art et pratiques au niveau international concernant la prise en compte des impacts sanitaires des filières de traitement des déchets", 152p.
31. REIN, Arno, BITTENS, Martin, TEUTSCH, Georg - Université de Tübingen (Allemagne), (Février 2002), "Évaluation des risques sanitaires et écologiques pouvant découler de la dépollution des sols in situ au moyen de micro-organismes génétiquement modifiés", 2p.
32. SCHIESSER, Philippe (Ecoeff/Eco-Conception Conseils), (Mars 2003), "Quatre démarches d'éco-conception", 9p.
33. SONDAGE EXPRESSION PUBLIQUE (www.expression-publique.com), "Quelles sont vos préoccupations sur la santé et l'environnement ?"
34. SONDAGE IFOP - ADEME (Mars 2002), "Les entreprises face aux enjeux énergie et environnement", 8p.

VI. ANNEXES

Annexe 1 : Gestion des déchets

ANNEXE 1 - GESTION DES DÉCHETS

INTRODUCTION

L'activité « gestion des déchets » est souvent considérée comme un enjeu environnemental à part entière bien que, en réalité, ce soit les différents procédés de traitement, d'élimination et de transport des déchets qui génèrent des pollutions qui ont des effets sur l'environnement. Chacun de ces effets peut être classé dans un des 4 thèmes repris ci-dessus. Étant donné l'intérêt de RE.C.O.R.D. pour ce sujet, nous avons traité cette activité en annexe.

Il y a un siècle les déchets étaient déversés dans la nature ou dans des décharges plus ou moins légales et contrôlées. Ceci a donné lieu à des problèmes de pollution des rivières, des nappes phréatiques, des océans, de perturbation des chaînes alimentaires et au développement de maladies (peste, choléra,...). Dans les pays industrialisés, de nombreuses solutions ont vu le jour : collecte, tri, traitements des déchets, recyclage et décharges contrôlées, ce qui a permis de réduire considérablement l'impact des déchets sur l'environnement.

Cependant, à mesure que la société devient plus riche et toujours plus productive, la demande de produits augmente. Si l'on ajoute à cela la diminution de la durée de vie des produits et l'accroissement de la population, on obtient des quantités croissantes de déchets. La gestion des déchets, en plus de mobiliser des terrains de valeur, entraîne le rejet de nombreux polluants dans l'air, l'eau et le sol, notamment de gaz à effet de serre émis par les procédés de valorisation (recyclage ou incinération), d'élimination (mise en décharge) et les activités de transport des déchets. En outre, les déchets contiennent en partie des ressources précieuses et souvent rares, qui peuvent être valorisées et recyclées afin de permettre de réduire l'utilisation de matières premières vierges.

En raison du manque de données globales au niveau de l'UE, il est difficile de déterminer si les incidences de la gestion des déchets sur l'environnement vont en s'atténuant ou en s'aggravant. Les nouvelles installations de traitement des déchets répondent à des normes de fonctionnement extrêmement élevées, qui permettent de réduire sensiblement les émissions et les risques. Pourtant, une grande partie des déchets que nous produisons continue d'être acheminée vers des installations plus anciennes et moins bien gérées. De plus, l'établissement d'un site d'élimination génère des désagréments autres que toxiques comme : les nuisances que constituent les odeurs, le bruit, un transport routier lourd accru sont autant d'impacts que l'on regroupe sous le vocable du syndrome "NYMBY"⁵⁵. Celui-ci s'exprime également sur le plan économique. Le développement d'un quartier à proximité d'un site pourra être influencé à long terme et on a quelquefois constaté une dégradation du tissu social ou des baisses d'évaluation foncière.

Les déchets suivants (peintures, solvants, résines, huiles usagées, métaux lourds, piles, tubes fluorescents, produits phytosanitaires, résidus industriels divers, emballages souillés...) sont considérés comme dangereux⁵⁶. Du fait de leurs propriétés physiques, chimiques ou biologiques, ils présentent un risque pour la santé ou l'environnement si les conditions de stockage, de transport et d'élimination ne sont pas respectées.

⁵⁵ *Not In My Backyard (pas dans mon jardin).*

⁵⁶ *Pour plus d'information sur la classification des déchets :*

<http://www.ademe.fr/entreprises/Dechets/themes/reglementation/classification.asp>

IMPACTS DES PROCÉDÉS POLLUANTS

MISE EN DÉCHARGE

Les impacts les plus importants sont liés à la mise en décharge des déchets solides. Le tiers des déchets solides municipaux sont des substances putrescibles, dont l'enfouissement ne permettra pas la dégradation naturelle aérobie, mais au contraire forcera à une putréfaction anaérobie qui émet des gaz combustibles (méthane), de dioxyde de carbone (CO₂) et de l'eau, en plus de 1 % d'autres vapeurs malodorantes et/ou toxiques.

INCINÉRATION

L'incinération décompose la matière à travers l'oxydation, et réduit le volume des déchets dans une proportion de 90 %.

En brûlant les déchets, l'incinération dégage cinq types d'émissions :

- de l'eau,
- des gaz (CO, CO₂, NO_x, SO₂, HCl, HF),
- de la poussière minérale (cendres),
- des métaux lourds (Pb, Hg, Cd, Cu, Ni, Cr, As, Mg),
- des molécules organiques (carbone, dioxines,...).

Ces émissions peuvent être traitées par épuration des fumées mais il n'en demeure pas moins que nombre d'entre elles présentent un potentiel toxique pour les hommes et l'environnement (en particulier dû aux dioxines qui ont un impact majeur sur la santé humaine via l'accumulation dans la chaîne alimentaire). Bien que limités, pour des installations modernes répondant aux normes de fonctionnement, ces risques sont considérés comme un enjeu environnemental majeur pour les riverains et les autorités publiques. En particulier, les émissions de dioxines sont la principale source de risque pour la santé humaine lié aux incinérateurs de déchets ménagers. Au niveau des émissions de GES, la part de l'incinération dans les émissions de CO₂ est négligeable par comparaison à d'autres sources (automobiles, activités industrielles, chauffage et combustion du charbon). De plus, plusieurs études ont montré que la mise en décharge des déchets ménagers dégageait davantage d'" équivalent CO₂ " que l'incinération⁵⁷ en raison de la production de méthane.

Ce bilan comparatif évolue car :

- d'une part, les nouvelles installations d'incinération produisent de l'électricité, ce qui permet d'éviter la combustion d'énergie fossiles
- d'autre part, les décharges sont de plus en plus équipées de systèmes de récupération du biogaz qui peut également être valorisé comme combustible.

⁵⁷ Selon une étude Norvégienne, la quantité totale d'équivalent CO₂ d'une tonne de déchets mis en décharge est de 3.491 kg contre 972 kg lorsque les déchets sont incinérés, soit 3,6 fois plus.

BIO-MÉTHANISATION

La méthanisation est un traitement biologique par voie anaérobie des matières fermentescibles conduisant à la production de biogaz et d'un digestat. Le biogaz est composé majoritairement de méthane (>50 %) et de CO₂. Le résidu (le digestat), après maturation par compostage, constitue un amendement organique dont les caractéristiques sont voisines de celles du compost. L'objectif premier de ce type de traitement consiste en une valorisation énergétique des déchets via la production de biogaz. La production d'un digestat valorisable en agriculture ne vient qu'au second plan contrairement au compostage où cet objectif de production d'un amendement valorisable est le premier objectif poursuivi.

Les **principaux problèmes environnementaux** sont :

- Émissions d'odeurs (durant la phase anaérobie)
- Contamination des eaux de ruissellement qui peuvent être en partie récupérées ou qui doivent être traitées dans une station d'épuration
- les émissions de bioaérosols comme risque potentiel pour les travailleurs et les riverains
- Impact visuel

LE COMPOSTAGE

Le compostage est un procédé de traitement biologique en présence d'oxygène des matières organiques (fractions fermentescibles des déchets ménagers - FFOM, déchets verts, boues de STEP,...) dans des conditions contrôlées. Il conduit à la production de gaz carbonique, de chaleur et d'un résidu solide riche en composés humiques : le compost. L'objectif premier de ce type de traitement consiste en la production d'un compost valorisable en agriculture.

Les **principaux problèmes environnementaux** sont :

- Émissions d'odeurs et de poussières (problème principal)
- Impact visuel
- Bioaérosols (particules microscopiques qui peuvent avoir des effets sur la santé des travailleurs)
- Problème de bruit lié au charroi ou aux matériels et de traitement et de tri
- Besoin de grandes aires de stockage (utilisation de l'espace)
- Contamination des eaux de ruissellement (qui peuvent être réutilisées pour l'humidification du compost)

LE RECYCLAGE

Globalement le recyclage des matières premières comme le verre, les plastiques, le papier, les métaux,... a un impact environnemental favorable grâce aux économies de matières premières et d'énergie réalisées. Néanmoins, les installations de recyclage, au même titre que d'autres installations industrielles, peuvent être responsables de problèmes environnementaux liés :

- à la combustion de combustibles fossiles
- aux rejets de polluants dans l'air, l'eau ou le sol
- aux nuisances directes pour l'homme (bruit et odeurs)
- au risque sanitaire (exemple : PCB dû au recyclage des huiles,...)
- ...