
GEN 272 – INGENIERIE DURABLE ET EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

NOTES DE COURS

S2 – APP 4

Hiver 2023 – Semaines 6 et 7

Département de génie électrique et de génie informatique
Faculté de génie
Université de Sherbrooke

Auteur(s): B. Roure et B. Amor

Version: 4 (25 janvier 2021)

Ce document est réalisé à l'aide de Microsoft Word.

©2021 Tous droits réservés. Département de génie électrique et de génie informatique,
Université de Sherbrooke.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX	vii
I. ANALYSE DU CYCLE DE VIE	8
1. L'approche cycle de vie	8
2. La méthodologie de l'ACV	10
a. Modèle conceptuel.....	10
b. Cadre général.....	10
c. Applications.....	12
d. Forces et limites.....	12
3. Phase 1 de l'ACV : Définition de l'objectif et du champ de l'étude.....	14
a. Définition du champ d'étude	14
b. Système de produits.....	14
c. Résumé	17
4. Phase 2 de l'ACV : Inventaire du cycle de vie (ICV)	19
a. Survol des principales étapes de l'ICV	20
b. Étape 1 : Quantification des flux pour chaque processus élémentaire	21
c. Étape 2 : Mise à l'échelle des processus élémentaires au flux de référence	28
d. Étape 3 : Calcul des flux élémentaires pour chaque processus élémentaire	30
e. Étape 4 : Somme des flux élémentaires émis par l'ensemble du cycle de vie.....	31
f. Analyse de contribution	31
g. Qualité des données.....	33
5. Phase 3 de l'ACV : Évaluation des impacts du cycle de vie (EICV)	34
a. Introduction à l'EICV	34
b. Classification	34
c. Caractérisation	35
d. Normalisation et pondération	39
e. Méthodes d'EICV	41
6. Phase 4 de l'ACV : Interprétation	43
II. LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX	46
1. Réchauffement climatique.....	47
a. L'amplification de l'effet de serre	47
b. Comment fonctionne l'effet de serre ?	48

c. Les gaz à effet de serre	49
d. Conséquences pour l'environnement	51
e. Conséquences physiques	52
f. Changements observés au Canada	56
2. Diminution de la couche d'ozone.....	57
a. L'ozone stratosphérique	57
b. Le trou de la couche d'ozone.....	58
c. Les caractéristiques spéciales de la météorologie aux pôles	60
d. Les processus chimiques menant à la destruction de l'ozone au-dessus des pôles.....	61
e. La production des radicaux chlorés	62
f. Conséquences des rayons UV sur la santé et l'environnement	62
3. Acidification.....	64
a. Généralités.....	64
b. Milieux touchés et sources	64
c. Processus	66
d. Conséquences de l'acidification.....	69
e. Exemple au Québec	72
4. Smog photochimique et chimique	73
a. Généralités.....	73
b. Distinction du smog d'été (« Los Angeles-type ») et du smog d'hiver (« London-type »).....	75
c. Conséquences du smog.....	79
5. Eutrophisation	81
a. Généralités.....	81
b. Sources et processus.....	82
c. Conséquences de l'eutrophisation	83
6. Toxicité humaine et écotoxicité.....	85
a. Généralités.....	85
b. Objectifs de l'écotoxicologie	85
c. Cheminement d'un toxique dans l'environnement	85
d. Cheminement d'un toxique dans un organisme	86
e. Mesure de la toxicité des composés chimiques	88
7. Utilisation des terres	90
8. Épuisement des ressources	91
a. Énergies non renouvelables	91
b. Autres	95

BIBLIOGRAPHIE	97
---------------------	----

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Étapes du cycle de vie d'un produit	9
Figure 2 Les deux sphères de l'ACV et leurs échanges	10
Figure 3 Cadre d'une ACV selon ISO 14040.....	11
Figure 4 Processus élémentaires.....	16
Figure 5 Arbre de processus de la production de lait	17
Figure 6 Arbre des processus de l'ampoule à incandescence.....	19
Figure 7 Processus élémentaire type et coefficients techniques	21
Figure 8 Flux économiques et élémentaires du processus assemblage et emballage de l'ampoule	23
Figure 9 Données autonomes normalisées soit par ampoule.....	24
Figure 10 Flux économiques et élémentaires du processus utilisation.....	24
Figure 11 Flux économiques et élémentaires normalisés du processus utilisation	25
Figure 12 Flux économiques et élémentaires du processus extraction et production des composantes de cuivre	25
Figure 13 Flux économiques et élémentaires du processus production du verre	26
Figure 14 Flux économiques et élémentaires du processus production du papier d'emballage.....	26
Figure 15 Flux économiques et élémentaires du processus production d'électricité	26
Figure 16 Flux économiques et élémentaires du processus d'enfouissement	27
Figure 17 Flux économiques et élémentaires du processus transport par camion.....	27
Figure 18 Mise à l'échelle des flux économiques et élémentaires du processus utilisation.....	28
Figure 19 Mise à l'échelle des flux économiques et élémentaires du processus production d'électricité ..	29
Figure 20 Mise à l'échelle des flux économiques et élémentaires du processus assemblage et emballage	29
Figure 21 Mise à l'échelle des flux économiques et élémentaires du processus enfouissement	29
Figure 22 Résultat de la mise à l'échelle de tous les processus élémentaires du système	30
Figure 23 Étapes du cycle de vie du système étudié	32
Figure 24 Exemples de classification de quelques substances	35
Figure 25 Contribution au réchauffement climatique du CO ₂ et du CH ₄	36
Figure 26 Catégories problèmes d'une ACV comparative de matériaux pour un bloc avant d'une auto ...	38
Figure 27 Provenance géographique de quelques méthodes d'EICV	41
Figure 28 Rapport émissions CO ₂ et consommation d'énergie non renouvelable	44
Figure 29 Résultats possibles lors d'une analyse de sensibilité	44
Figure 30 Projections d'augmentation de la température globale selon différents scénarios d'émissions..	47
Figure 31 Évolution des concentrations moyennes des GES dioxyde de carbone, méthane et protoxyde d'azote	48
Figure 32 Le phénomène d'effet de serre.....	49
Figure 33 Part des émissions anthropiques de GES par gaz	50
Figure 34 Bilan radiatif de la Terre	52
Figure 35 Mort des coraux à cause de l'acidité des eaux	53
Figure 36 La « boucle » de la circulation thermohaline des eaux terrestres	54
Figure 37 Carte de synthèse des impacts des changements climatiques par région	55
Figure 38 Augmentation des températures moyennes au Canada entre 1948 et 2012 (gauche) et effets des changements climatiques au Canada (à droite)	56
Figure 39 Cycle de formation et de destruction de l'ozone	57

Figure 40 Description des différentes strates de l'atmosphère terrestre et de la capacité de la couche d'ozone à filtrer les rayons ultraviolets selon les longueurs d'ondes	58
Figure 41 Trou dans la couche d'ozone en Antarctique pour les mois de septembre de 1996 à 2012 et sa superficie	59
Figure 42 Évolution de la consommation des SACO dans le monde.....	59
Figure 43 Schématisation des conditions météorologiques particulières au-dessus du pôle sud	60
Figure 44 Schémas synthétiques décrivant la chimie de la destruction de l'ozone en présence des PSC ...	61
Figure 45 Effets des rayons UV-A et UV-B sur la peau	63
Figure 46 Un lac avec une couleur bleue profonde est un signe d'acidification	64
Figure 47 Cycle actuel du soufre avec les quantités (en Tg/an) estimées des émissions	65
Figure 48 Plage de pH des pluies acides	66
Figure 49 Les pluies acides entrent directement dans le cours d'eau ou s'infiltrent par captage	66
Figure 50 Origine de l'acidité des lacs au Québec.....	67
Figure 51 Répartition des charges critiques acides dans le nord-est de l'Amérique du Nord	68
Figure 52 Processus de déposition de substances acidifiantes	69
Figure 53 Statues endommagées par l'acidité des pluies	69
Figure 54 Forêt de conifères attaquées par l'acidité des pluies.....	70
Figure 55 Influence des pluies acides sur les systèmes aquatiques selon le degré d'acidification.....	71
Figure 56 Effets du pH sur la diversité des espèces animales et végétales au Québec	72
Figure 57 Différences entre le « bon » et le « mauvais » ozone selon les strates de l'atmosphère	73
Figure 58 Pékin sous l'effet du smog, fréquemment observé	74
Figure 59 Substances responsables du smog photochimique au Québec par secteur d'émissions	75
Figure 60 Les deux types de smog et leurs conditions de formation	76
Figure 61 Smog photochimique	77
Figure 62 Évolution journalière typique des concentrations en polluants primaires et secondaires responsables du smog photochimique	78
Figure 63 Processus d'inversion thermique comparé à l'état normal de la troposphère	78
Figure 64 Pyramide des effets de la pollution atmosphérique sur la santé.....	79
Figure 65 Étendue d'eau chargée d'algues sous l'effet de l'eutrophisation	81
Figure 66 Sources principales des rejets de nutriments.....	82
Figure 67 Processus d'eutrophisation.....	83
Figure 68 Transformation d'un lac en marais, en prairie puis en forêt à cause de l'eutrophisation.....	84
Figure 69 Chaîne de cause à effet d'une émission jusqu'aux effets sur la population humaine et les écosystèmes.....	86
Figure 70 Les voies d'exposition (gauche) d'un produit dans l'organisme et son cheminement après l'entrée (droite).....	88
Figure 71 Les zones cultivées par l'Homme en 2000	90
Figure 72 Ressources renouvelables et non renouvelables	91
Figure 73 Évolution des réserves mondiales d'hydrocarbures	92
Figure 74 Variation des quantités d'hydrocarbures en fonction de la profondeur et la température (à gauche) et les différents types de charbons selon les conditions (à droite)	93
Figure 75 Évolution des ressources d'uranium dans le monde	94
Figure 76 Fission nucléaire de l'uranium 235	94
Figure 77 Années d'épuisement des richesses exploitables au rythme actuel de consommation	95
Figure 78 Évolution de la population de la morue dans l'Atlantique du Nord	96

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Émissions de CO ₂ par processus élémentaire pour l'ampoule à incandescence.....	27
Tableau 2 Émissions normalisées par unité fonctionnelle et par processus élémentaire	30
Tableau 3 Contribution par unité fonctionnelle des processus élémentaires.....	32
Tableau 4 Facteurs de caractérisations de certains GES	37
Tableau 5 Facteurs de dommage de la méthode IMPACT 2002+	39
Tableau 6 Facteurs de normalisation européens et canadiens	40
Tableau 7 Catégories intermédiaires et de dommages selon IMPACT 2002+.....	42
Tableau 8 Durée de vie dans l'atmosphère et GWP de certains GES	51

I. ANALYSE DU CYCLE DE VIE

L'objectif de ce chapitre est de présenter la méthodologie de l'analyse du cycle de vie qui permet d'évaluer les impacts d'un système ou d'un produit sur tout son cycle de vie et selon différentes problématiques environnementales actuelles présentées au Chapitre 2.

1. L'approche cycle de vie

L'approche cycle de vie correspond à un concept de production et de consommation. Elle vise la prise en compte des relations environnementales, économiques et sociales propre à un produit ou à un service pendant tout son cycle de vie.

La définition formelle du « cycle de vie » d'un produit est la suivante :

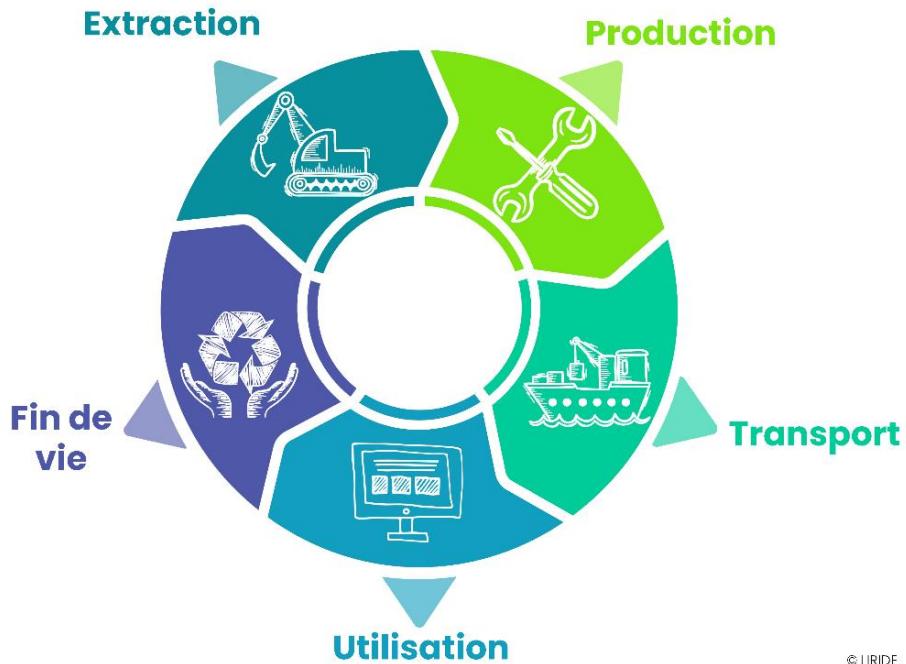
« Étapes consécutives et interreliées de la vie d'un produit, d'un service ou d'une activité, partant de l'extraction des matières premières jusqu'à l'élimination finale en fin de vie. La prise en compte de l'ensemble des étapes du cycle de vie entre dans le concept du « berceau au tombeau ». »

Les étapes généralement incluses dans le cycle de vie d'un produit sont :

- L'extraction et transformation des ressources naturelles ;
- La fabrication des composantes ;
- L'assemblage du produit fini ;
- L'emballage et distribution du produit ;
- L'utilisation du produit ;
- L'entretien du produit ;
- La gestion du produit en fin de vie (recyclage, enfouissement, etc.) ;
- Le transport tout au long du cycle de vie.

Cette liste est non exhaustive et peut comporter d'autres étapes selon la nature des produits ou services évalués. Bien que le cycle de vie de produits soit le plus souvent mentionné, le concept de cycle de vie s'applique également aux services. Par exemple, il est possible (et fréquent) d'étudier le cycle de vie d'une communication téléphonique, d'un mode de transport, du traitement d'eau usée, etc.

Il est aussi possible d'appliquer le concept de manière partielle en se limitant à des matériaux, des procédés, etc. Dans ces cas, on considère normalement toutes les étapes du cycle de vie en amont de la production du matériau ou du procédé, mais on néglige les étapes d'utilisation et de fin de vie (par exemple, le cycle de vie de la production d'aluminium, de plastiques, etc.).



© LIRIDE

Figure 1 Étapes du cycle de vie d'un produit

Chaque étape du cycle de vie consomme de l'énergie et des ressources et génère des impacts sociaux, économiques et environnementaux. L'approche cycle de vie vise à minimiser les impacts négatifs et à accentuer les impacts positifs, tout en évitant de déplacer les problèmes d'une étape à l'autre du cycle de vie ou d'une problématique environnementale à une autre. Elle est appliquée grâce à une série d'outils de gestion du cycle de vie, en particulier :

- L'analyse (environnementale) du cycle de vie (ACV) ;
- L'analyse des coûts du cycle de vie ;
- L'analyse sociale du cycle de vie ;
- L'éco-étiquetage ;
- La conception écologique ou écoconception.

Appliquée à la conception de produits, aux procédés de production et comme soutien pour la prise de décision, l'approche cycle de vie est un concept essentiel de mise en œuvre du développement durable.

2. La méthodologie de l'ACV

a. Modèle conceptuel

En ACV, il faut considérer deux sphères : la technosphère et l'écosphère. La technosphère comprend l'ensemble des activités humaines (production, transformation, consommation, etc.), alors que l'écosphère représente l'environnement naturel (biosphère, atmosphère, hydrosphère, cycles biogéochimiques, etc.).

Ces deux sphères sont intimement liées. L'écosphère est source de toute matière première utilisée dans la technosphère. Elle est aussi le réservoir pour tous les rejets de la technosphère. Dans le jargon de l'ACV, les liens ou échanges entre la technosphère et l'écosphère sont appelés flux élémentaires. (Voir Figure 2)

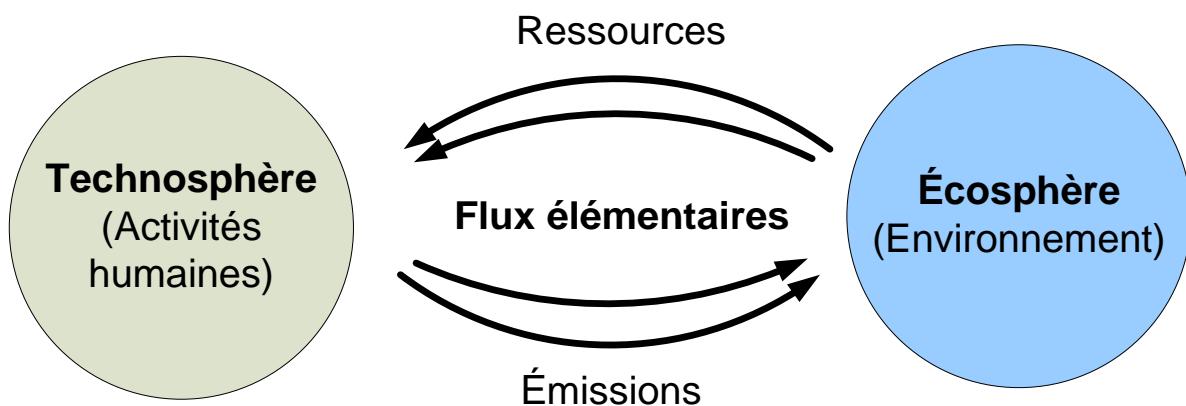


Figure 2 Les deux sphères de l'ACV et leurs échanges

En ACV, on considère, du côté de la technosphère, l'ensemble des activités faisant partie du cycle de vie du produit. Cet ensemble d'activités est appelé système de produit. Du côté de l'écosphère, on considère un large ensemble d'impacts environnementaux (changements climatiques, appauvrissement de la couche d'ozone, pluies acides, toxicité, etc.). En résumé, une ACV consiste à définir le système de produit, à déterminer tous les échanges entre le système de produit et l'environnement (flux élémentaires) et à calculer les impacts environnementaux associés à ces flux élémentaires. Les sections suivantes présentent de façon détaillée la méthodologie d'analyse du cycle de vie.

b. Cadre général

L'analyse du cycle de vie est une méthode d'analyse qui vise à évaluer de façon quantitative l'ensemble des impacts environnementaux potentiels d'un produit ou d'un service, en considérant tout son cycle de vie. Parmi les outils proposés par la gestion du cycle de vie, l'ACV constitue une des méthodes les plus complètes et performantes. L'ACV est le seul outil qui permette d'évaluer les conséquences environnementales d'un produit ou d'une activité (un système de produits) sur l'ensemble de son cycle de vie.

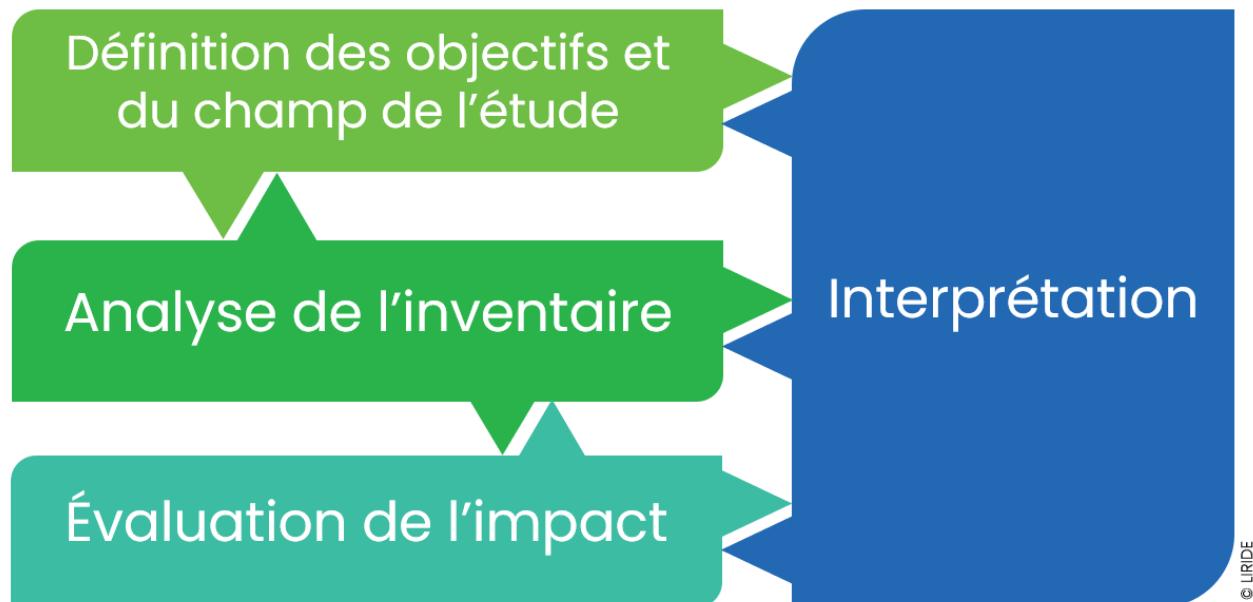
L'organisation internationale de normalisation (ISO) définit l'analyse du cycle de vie (ACV) comme suit :

« *Compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie* » (ISO, 2006a)

Régie par les normes de la série ISO 14040 et 14044, l'analyse du cycle de vie (ACV) comporte quatre phases :

- i. La définition des objectifs et du champ de l'étude (c'est à dire le cadre méthodologique auquel doivent se conformer les phases suivantes) ;
- ii. Le recueil de l'inventaire de tous les entrants et sortants du ou des systèmes de produits ;
- iii. L'évaluation des impacts potentiels liés à ces entrants et sortants ;
- iv. L'interprétation des données d'inventaire et des résultats de l'évaluation des impacts.

La Figure 3 présente le cadre d'une ACV, tel que suggéré par ISO. Comme le montre le schéma, l'ACV est un processus itératif. Les choix effectués au cours de l'étude peuvent être modifiés par l'acquisition d'informations nouvelles.



Des variantes à la méthode, dues à des contraintes de temps et/ou de coûts, ont été formulées selon les principes cadres établis par la *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC). Par exemple, les frontières du système peuvent être limitées à certaines étapes du cycle de vie, à certaines catégories d'impact ou encore uniquement aux plus grands contributeurs, identifiés selon le jugement et l'expérience d'experts.

L'analyse peut également être effectuée d'une façon strictement qualitative ou reposer essentiellement sur des données dites « secondaires », c'est-à-dire des données génériques

provenant de la littérature ou de banques de données. De telles simplifications affectent la précision et l'applicabilité des résultats de l'ACV, mais permettent tout de même l'identification des impacts potentiels et, dans une certaine mesure, leur évaluation.

c. Applications

L'ACV se révèle d'une très grande utilité pour l'évaluation de l'impact environnemental des produits et matériaux. L'industrie l'utilise de plus en plus dans son processus décisionnel. Par ailleurs, les renseignements fournis par l'ACV peuvent influencer les choix politiques ainsi que les décisions en matière de réglementation environnementale.

Selon (Jolliet, O.; Saadé, M.; Crettaz, P.; Shaked, 2017), les ACV sont principalement utilisées pour :

i. La comparaison environnementale des systèmes

L'ACV permet d'effectuer des comparaisons sur un plan environnemental :

- De produits similaires pour l'attribution d'écolabels ;
- D'étapes du cycle de vie, pour augmenter la valeur environnementale d'un produit ;
- De procédés ou de services pour alimenter une analyse de conformité ;
- De méthodes de production ;
- De choix de produits et de procédés.

ii. L'amélioration de la production

L'ACV peut être employée pour améliorer la production d'un point de vue environnemental. L'ACV sert ainsi d'outil d'aide à la décision pour investir dans de nouveaux produits et procédés, pour optimiser la consommation d'énergie et de matières premières, pour identifier des solutions en matière de réduction des rejets et pour choisir des substances plus « propres ».

iii. Le développement commercial

L'ACV permet d'aider au développement commercial :

- Pour l'obtention d'autorisations (dans le cas d'un nouveau produit, par exemple) ;
- Au niveau du marketing (pour la certification ou la création d'une image de marque) ;
- Comme support pour l'information au public (dans le cadre d'une déclaration environnementale de produit).

d. Forces et limites

L'ACV est un outil qui présente de nombreux avantages :

- C'est le seul outil permettant d'évaluer les impacts environnementaux potentiels d'un produit ou service sur l'ensemble de son cycle de vie ;
- C'est une méthode standardisée selon les normes ISO ;

- Elle fournit une vision d'ensemble d'un produit ou d'un service et permet d'éviter les déplacements de pollution d'une étape à l'autre du cycle de vie ;
- Elle peut, par exemple, orienter la prise de décision pour une entreprise (domaine micro-économique) ou aider les gouvernements à définir une politique publique (domaine macro-économique) ;
- Elle permet de remettre en question des idées reçues en fournissant des résultats objectifs et quantifiés qui peuvent faire contrepoids face à des choix politiques ou de société, à des « évidences » jamais remises en question ou à des habitudes de production et de consommation.

Cependant, l'ACV comporte certaines limites :

- Les résultats d'une ACV sont dépendants de la zone géographique d'où proviennent les données. Ainsi, des ACV réalisées en Europe ne peuvent être exploitées au Québec sans tenir compte de variations importantes liées au contexte géographique (par exemple, l'hydroélectricité est la principale source d'énergie québécoise tandis que l'Europe utilise d'autres sources d'énergie, comme le nucléaire) ;
- L'ACV évalue des impacts potentiels et non des impacts réels. Ceux-ci ne donneront donc pas d'informations relatives à des dépassements de normes ou à des risques environnementaux ;
- Les résultats de deux ACV sur un même sujet peuvent différer selon les objectifs visés, les processus employés, la qualité des données et les méthodes d'évaluation des impacts. C'est pourquoi les normes ISO insistent sur la transparence de la méthode ;
- Une ACV détaillée requiert un grand nombre de données et de ressources nécessitant en particulier des bases de données et des logiciels spécialisés. Des experts doivent manipuler correctement ces informations et ces outils afin d'interpréter les résultats de l'ACV de la façon la plus juste.

3. Phase 1 de l'ACV : Définition de l'objectif et du champ de l'étude

a. Définition du champ d'étude

La première phase de l'ACV, appelée définition de l'objectif et du champ de l'étude, présente essentiellement la raison de l'étude et la façon dont celle-ci sera conduite afin d'atteindre cet objectif (i.e. le modèle d'étude définissant le cadre méthodologique auquel devront se conformer les phases subséquentes de l'ACV).

L'application envisagée et le public cible doivent d'abord être clairement définis puisqu'ils vont fixer la profondeur et l'ampleur de l'étude.

Selon les normes ISO, la définition du champ de l'étude doit comporter les éléments suivants :

- Le système de produits à étudier ;
- Les frontières du système ;
- Les règles d'imputation ;
- Les types d'impacts et les méthodologies d'évaluation des impacts et d'interprétation à utiliser ;
- Les exigences portant sur les données ;
- Les hypothèses ;
- Les limitations ;
- Les exigences initiales de la qualité des données.

Bien qu'il s'agisse de la première étape, il ne faut pas oublier que l'ACV est un processus itératif, il est donc nécessaire de revenir sur ces éléments tout au long de l'analyse. Certains de ces éléments ne pourront pas être définis clairement au début du projet, ils se dessineront tout au long de l'analyse. Par exemple, les hypothèses qui devront être posées ne seront pas toutes évidentes de prime abord, elles dépendront, entre autres, des données qui seront disponibles.

Selon les normes ISO, les analyses du cycle de vie s'effectuent en mettant au point des modèles qui décrivent les éléments clés des systèmes physiques. Le système de produits représente les activités humaines considérées dans l'étude. L'évaluation des impacts est basée sur des modèles (mécanismes environnementaux) qui lient les interventions environnementales de ces activités et leurs effets potentiels sur l'environnement.

b. Système de produits

Les normes ISO définissent un **système de produits**¹ comme un ensemble de processus élémentaires liés par des flux de matière et d'énergie qui remplissent une ou plusieurs fonctions. Les caractéristiques d'un système de produits sont qu'il :

- Doit absolument fournir la **fondation** définie par l'**unité fonctionnelle** ;
- Échange des **flux élémentaires** avec l'environnement ;
- Est composé de **processus élémentaires**.

¹ Modèle représentant le *cyclage de vie* d'un produit

Dans ce sens, le sujet d'une ACV, que ce soit un produit, un procédé ou un service, est caractérisé par ses fonctions. Ceci permet la comparaison de produits qui n'ont pas la même performance fonctionnelle par unité de produit.

Exemple : Une tasse en polystyrène est à usage unique alors qu'une tasse en céramique est réutilisée plusieurs fois. Elles ont pourtant la même fonction, qui est de contenir du café chaud.

Lors d'une étude comparative, il est nécessaire de comparer des produits, procédés ou services ayant la même fonction. La quantification de la performance fonctionnelle, au moyen de l'**unité fonctionnelle**, fournit une référence à partir de laquelle sont mathématiquement normalisés les entrants et les sortants des systèmes comparés.

Exemple : Il est possible de comparer la tasse de polystyrène et la tasse de céramique en basant les calculs sur l'unité fonctionnelle de boire 2 tasses de café par jour durant un an.

Le **flux de référence** est la quantité de produit nécessaire pour remplir une unité fonctionnelle.

Exemple : Ainsi pour une unité fonctionnelle, une seule tasse de céramique est nécessaire, alors que pour le deuxième produit analysé c'est 730 tasses de polystyrène qui le sont. Le flux de référence pour la tasse de polystyrène sera de 730 tasses, mais le flux de référence pour la tasse de céramique ne sera pas de 1 puisque la tasse de céramique peut être utilisée plus de 730 fois. S'il est supposé que la tasse de céramique puisse être utilisée 2000 fois, alors le flux de référence pour cette tasse sera de 730/2000^{ème} tasse de céramique.

Les paramètres clés sont les paramètres liant le flux de référence à l'unité fonctionnelle. Dans l'exemple des tasses de café, le paramètre clé liant le produit à l'unité fonctionnelle (i.e. l'unité de comparaison de la fonction) est le nombre d'utilisations possible des tasses. Ce sont les paramètres sur lesquels on peut jouer pour influencer directement les impacts du produit sur l'environnement. Ainsi, en doublant les paramètres clés, les impacts sur l'environnement sont diminués de moitié.

Exemple : En doublant le paramètre clé « nombre d'utilisations » de la tasse de polystyrène, en utilisant la même tasse toute la journée, son impact sur l'environnement est diminué de moitié.

La spécification de l'unité fonctionnelle est le point de départ de la définition des frontières du système de produits puisqu'elle indique quels sont les **processus élémentaires** qui doivent être inclus pour remplir cette fonction. Un processus élémentaire, tel que défini par l'ISO, est la plus petite partie d'un système de produits pour laquelle sont recueillies des données (i.e. il peut représenter un procédé chimique spécifique ou une usine complète incluant de nombreux sous-procédés). C'est un constituant élémentaire du système de produits, représentant une activité économique/opération (ou un ensemble d'activités économiques/opérations).

Un processus élémentaire est caractérisé par ses entrants et sortants, si le processus élémentaire représente plus d'un sous-procédé, leurs entrants et sortants sont alors agrégés ensemble. Selon l'ISO, les processus élémentaires sont liés les uns aux autres par des **flux de produits intermédiaires**, à d'autres systèmes de produits par des **flux de produits (ou de référence)** et à l'environnement par des **flux élémentaires** (Figure 4). Les flux de produits intermédiaires et les flux de référence peuvent être regroupés sous le terme flux économiques (matière, énergie ou service).

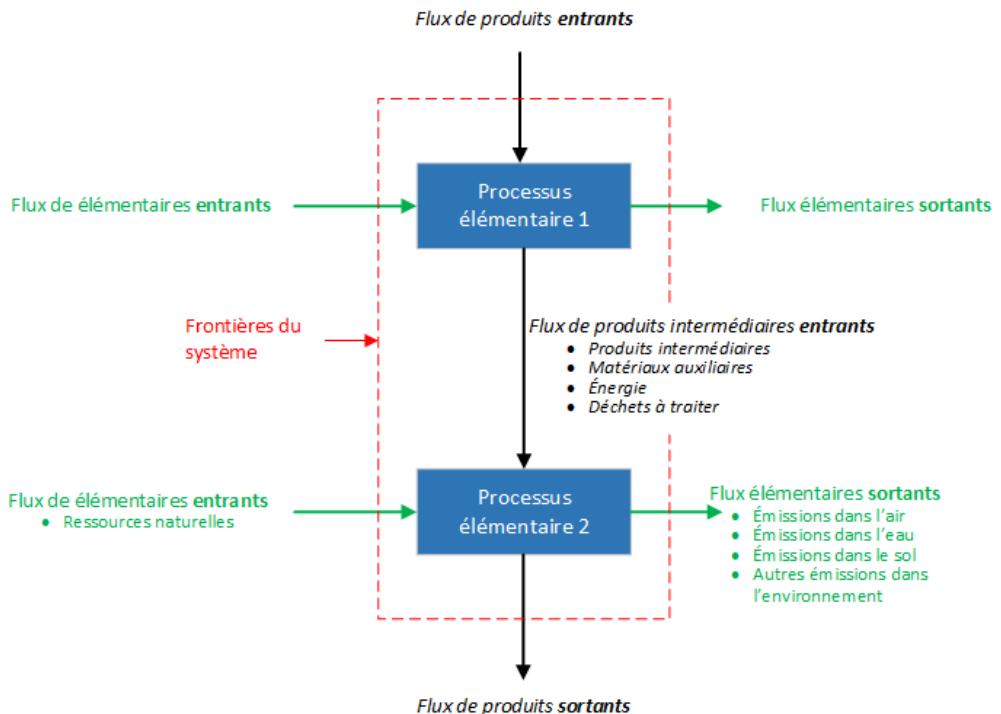


Figure 4 Processus élémentaires

Les frontières ou limites du système sont définies en respectant les objectifs de l'ACV. La définition de ces limites va déterminer quels processus seront inclus dans la modélisation du système. Un bon exemple de l'importance de la définition du système sur les résultats d'une étude est la comparaison de l'impact d'un repas en restauration rapide et d'un repas dans un restaurant conventionnel, telle que présentée dans le livre de Jolliet et al. (2017). Les conclusions de cette étude datant des années 1990 étaient que le repas en restauration rapide avait moins d'impacts que le repas en restauration conventionnelle. Toutefois, lorsque les frontières de l'étude sont examinées de plus près, on se rend compte que les systèmes comparés n'étaient pas fonctionnellement équivalents. En effet, pour une unité fonctionnelle de 1 repas complet pour adulte, les auteurs de l'étude avaient limité les frontières du système au restaurant. Ainsi, seules les étapes de cuisson, nettoyage, chauffage et éclairage étaient considérées dans le cas de la restauration rapide, alors que pour le restaurant conventionnel, en plus de ces étapes, les étapes de lavage de la vaisselle et de conditionnement des aliments étaient considérées. De ce fait, les systèmes comparés n'étaient pas fonctionnellement équivalents, les frontières étant représentées par les limites physiques du restaurant.

Afin de guider la définition des frontières du système de produits et d'assurer une certaine cohérence entre les études d'ACV, certaines règles ont été établies.

Règles de définition des frontières du système :

- i. Les systèmes comparés devraient être fonctionnellement équivalents.
- ii. Les processus retenus sont ceux contribuant au moins à x% de la masse des entrants, x% de la consommation énergétique ou x% des émissions d'un polluant, où x est un seuil préalablement défini (ex. 1%).
- iii. Les étapes identiques dans les différents scénarios peuvent être exclues si cette exclusion n'affecte pas l'équivalence fonctionnelle entre les scénarios.

On appelle arbre de processus le schéma représentant les flux échangés dans le système. Chaque processus élémentaire est représenté, ainsi que les flux entrants et sortants les reliant. Cet arbre de processus peut devenir très complexe, c'est pour cela qu'il doit être bâti de façon systématique.

Exemple : voici l'arbre de processus de la production de lait au Québec

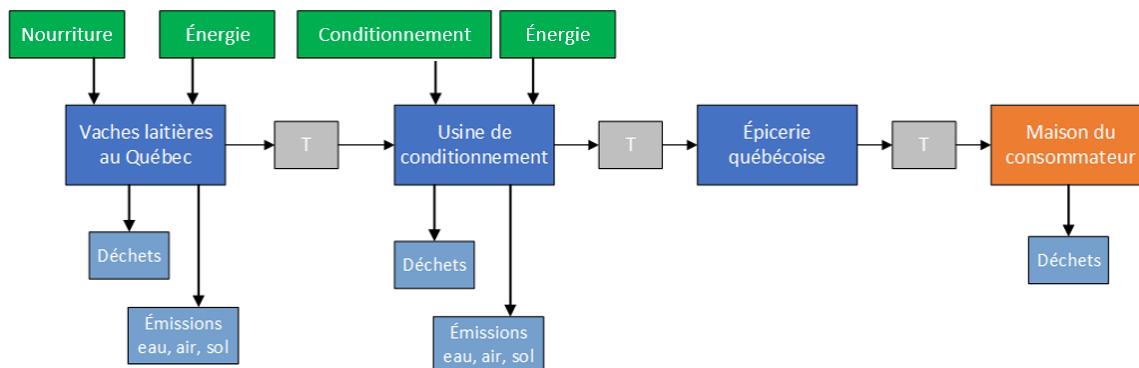


Figure 5 Arbre de processus de la production de lait

c. Résumé

Lors de la première phase de l'ACV, trois aspects importants menant à l'inventaire du cycle de vie ont été définis :

- L'unité fonctionnelle : valeur quantifiant la fonction fournie par le système de produits et sur la base de laquelle les différents scénarios peuvent être comparés.
- Le système de produits : l'ensemble des processus élémentaires nécessaires pour remplir la fonction à l'étude.
- Le flux de référence : quantité de produit nécessaire pour remplir la fonction à l'étude. Il sert à calculer les entrants et les sortants correspondant à la performance du système. Il peut être différent pour chaque scénario, même si les scénarios ont la même unité fonctionnelle.
- Frontière du système de produit : séparent les processus élémentaires de la technosphère inclus dans l'étude de ceux qui sont exclus.

- Arbre de processus : Diagramme des « flux économiques » échangés entre les processus élémentaires du système de produit.

Ces éléments servent ensuite pour la phase suivante d'inventaire des émissions et extractions. Celle-ci sert à calculer la quantité totale de flux élémentaires émis par le système de produits, par unité fonctionnelle.

Exemple de l'ampoule à incandescence : définition des objectifs et du champ de l'étude

Objectif de l'étude : L'objectif de l'étude est de calculer le CO₂ émis par une ampoule à incandescence durant son cycle de vie complet. Cette ampoule est produite et utilisée en Europe.

Fonction de l'ampoule : La fonction principale de l'ampoule est d'éclairer. Une ampoule peut aussi avoir des fonctions secondaires comme réchauffer, créer une atmosphère agréable, etc. Ces fonctions secondaires seront considérées négligeables.

Unité fonctionnelle : L'unité fonctionnelle doit chiffrer deux aspects de la fonction soit l'*intensité de l'éclairage* et la *durée de l'éclairage*. L'intensité d'un éclairage se mesure en *lumens*. Pour cette étude, la quantité d'éclairage de 600 lumens a été fixée (éclairage fourni par une ampoule à incandescence de 60 Watts). La durée de l'éclairage à 100 heures a également été fixée. L'unité fonctionnelle est donc d'*éclairer à 600 lumens pendant 100 heures*.

Flux de référence : Deux flux de référence doivent être calculés soit (1) le nombre total d'ampoules nécessaires et (2) la quantité d'électricité nécessaire lors de l'utilisation.

- Nombre d'ampoules : Le paramètre clé pour déterminer le nombre d'ampoules nécessaires est la *durée de vie* de l'ampoule. Cette durée de vie est estimée à 1000 heures. Pour éclairer pendant 100 heures (unité fonctionnelle), nous avons donc besoin de :

$$100/1000=0,1 \text{ ampoule/unité fonctionnelle.}$$

- Quantité d'électricité : L'ampoule est de 60 W (60 J/s). Pour éclairer pendant 100 heures, nous avons donc besoin de :

$$100 \text{ heures/UF} * 60 \text{ W} = 6 \text{ kWh/unité fonctionnelle}$$

Système de produits : L'étude tiendra compte des étapes du cycle de vie suivantes² :

- Production du verre : 20 grammes de verre entrent dans la composition d'une ampoule.
- Production du cuivre : 15 grammes de cuivre entrent dans la composition d'une ampoule.
- Transport des composantes : Les composantes de l'ampoule sont transportées par camion à l'usine d'assemblage. Le cuivre est transporté sur une distance de 200 km et le verre sur une distance de 5 km.

² Notez qu'il s'agit d'un système de produits simplifié – plusieurs composantes de l'ampoule ont été négligées pour simplifier l'exemple (ex. production d'argon, d'aluminium, plomb, etc.).

- Production du papier d'emballage : 10 grammes de papier d'emballage kraft non-blanchi sont utilisés par ampoule. Le papier est transporté sur une distance de 50 km jusqu'à l'usine d'assemblage.
- Assemblage et emballage : L'assemblage de l'ampoule et son emballage se font en utilisant de l'énergie produite sur le site de l'entreprise.
- Distribution : L'ampoule doit être transportée par camion vers l'utilisateur final, en moyenne sur une distance de 50 km.
- Utilisation : L'utilisation se limite à l'électricité (60 W).
- Fin de vie : L'étape de fin de vie consiste en (1) le transport de l'ampoule vers un lieu d'enfouissement sanitaire (100 km) et (2) son enfouissement.

Ainsi l'*arbre de processus* correspondant est le suivant :

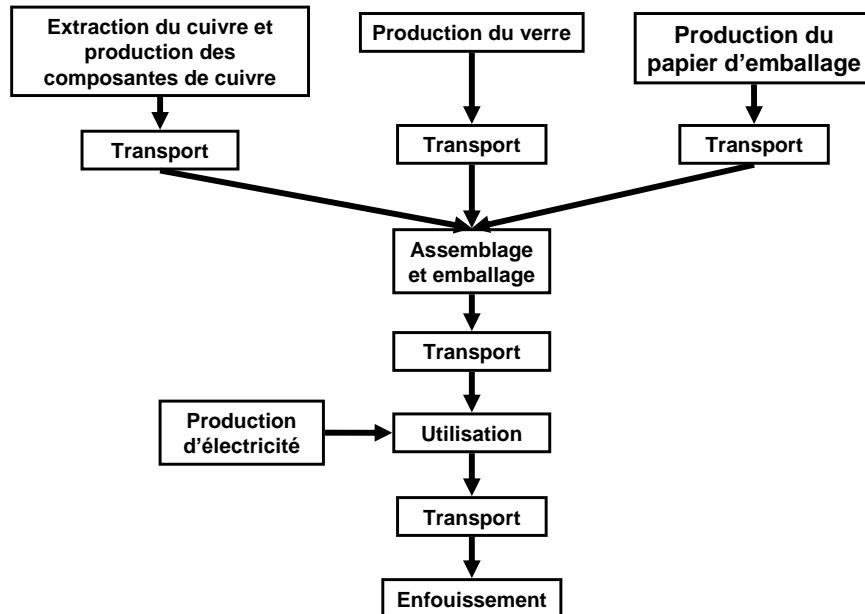


Figure 6 Arbre des processus de l'ampoule à incandescence

Chacun de ces processus élémentaires émet une grande variété de substances potentiellement contaminantes. Cependant, l'objectif de l'étude étant de calculer la quantité totale de CO₂ émise par l'ensemble du système de produits, pour 100 heures d'éclairage, seul ce flux élémentaire sera bien pris en considération par la suite.

4. Phase 2 de l'ACV : Inventaire du cycle de vie (ICV)

Nous avons précisé les définitions de l'objectif et du champ de l'étude. Nous explorerons maintenant la deuxième phase de l'ACV, l'ICV. C'est lors de cette phase que, par unité fonctionnelle, sont calculées les quantités des flux élémentaires (ressources naturelles, émissions dans l'air, l'eau et les sols, etc.) échangés entre le système de produits (technosphère) et l'environnement (écosphère).

Comme mentionné et afin de simplifier les exemples, un seul type de flux élémentaire sera considéré soit le CO₂, qui est un gaz à effet de serre contribuant aux changements climatiques. Puis, nous verrons comment élargir la démarche à un plus grand nombre de flux élémentaires.

a. Survol des principales étapes de l'ICV

Une fois l'unité fonctionnelle, le flux de référence et le système de produits définis, l'inventaire du cycle de vie peut se calculer en quatre étapes :

- Étape 1 : Quantification des flux pour chaque processus élémentaire.

Cette étape consiste à calculer, trouver dans la littérature ou dans des banques de données spécialisées, des données sur les différents processus élémentaires. Il en résulte des **données autonomes** (*stand-alone data*), c'est-à-dire des données qui ne sont pas encore mises à l'échelle de l'unité fonctionnelle ou des autres processus élémentaires.

- Étape 2 : Mise à l'échelle de chaque processus élémentaire au flux de référence.

Cette étape consiste à déterminer dans quelle mesure chaque processus élémentaire est sollicité dans l'objectif de répondre à l'unité fonctionnelle. Il en résulte un **inventaire de production**.

- Étape 3 : Calcul des bilans de flux élémentaires pour chaque processus élémentaire.

Une fois qu'est connu dans quelle mesure chaque processus élémentaire est sollicité, il est possible de calculer, par unité fonctionnelle, la quantité d'émissions produites et la quantité de ressources naturelles utilisées pour chacun d'entre eux.

- Étape 4 : Somme des flux élémentaires émis par le système de produits complet.

Les flux élémentaires étant désormais connus pour chacun des processus élémentaires, il suffit d'en faire la somme pour connaître l'inventaire du cycle de vie.

Exemple de l'ampoule à incandescence, seulement le flux élémentaire CO₂ : survol des principales étapes de l'inventaire du cycle de vie

Étape 1 : Quantification des flux pour chaque processus élémentaire.

Pour l'exemple, cette étape revient à trouver des données d'émissions de CO₂ pour chacun des processus élémentaires du système de produits soit pour la production de verre ou d'électricité, le transport, etc.

Étape 2 : Mise à l'échelle de chaque processus élémentaire au flux de référence.

Pour l'exemple, cette étape consiste à déterminer dans quelle mesure chaque processus élémentaire est sollicité pour remplir l'unité fonctionnelle soit combien de verre, combien de transport, combien d'électricité, etc.

Étape 3 : Calcul des bilans de flux élémentaires pour chaque processus élémentaire.

Connaissant les émissions de CO₂ par unité de production pour chaque processus élémentaire (étape 1) et la quantité de produit nécessaire pour chaque processus élémentaire (étape 2), il est possible, par simple multiplication, de connaître les émissions de CO₂ rapportées à l'unité fonctionnelle de chaque processus élémentaire.

Étape 4 : Somme des flux élémentaires émis par le système de produits complet.

Connaissant maintenant la quantité de CO₂ émis pour chaque processus élémentaire, par unité fonctionnelle, il est possible de connaître la quantité totale de CO₂ émis par le système de produits en faisant tout simplement la somme.

b. Étape 1 : Quantification des flux pour chaque processus élémentaire

Cette étape consiste à chercher de l'information quantitative sur les entrants et sortants pour chaque processus élémentaire du système de produits. Ces données sont appelées des *données autonomes*³ : elles ne font pas encore référence à l'unité fonctionnelle de l'étude.

Une convention est utilisée dans la description d'un processus élémentaire : les flux entrants sont *négatifs* (car ils sont extraits de l'écosphère) et les flux sortants sont *positifs* (car ils sont émis dans l'écosphère). Les données quantitatives sur les différents flux sont appelées les *coefficients techniques*. Ainsi, pour le processus élémentaire représenté à la Figure 7, nous avons :

- a_{ij} = Quantité a de flux économique de type i associé au processus élémentaire j, $a_{ij}<0$ pour le flux économique entrant et $a_{ij}>0$ pour le flux économique sortant
- b_{kj} = Quantité b de flux élémentaire de type k associé au processus élémentaire j, $b_{kj}<0$ pour le flux élémentaire entrant et $b_{kj}>0$ pour le flux élémentaire sortant.

Pour l'instant, nous ne nous intéressons qu'à un type de flux élémentaire : le CO₂.

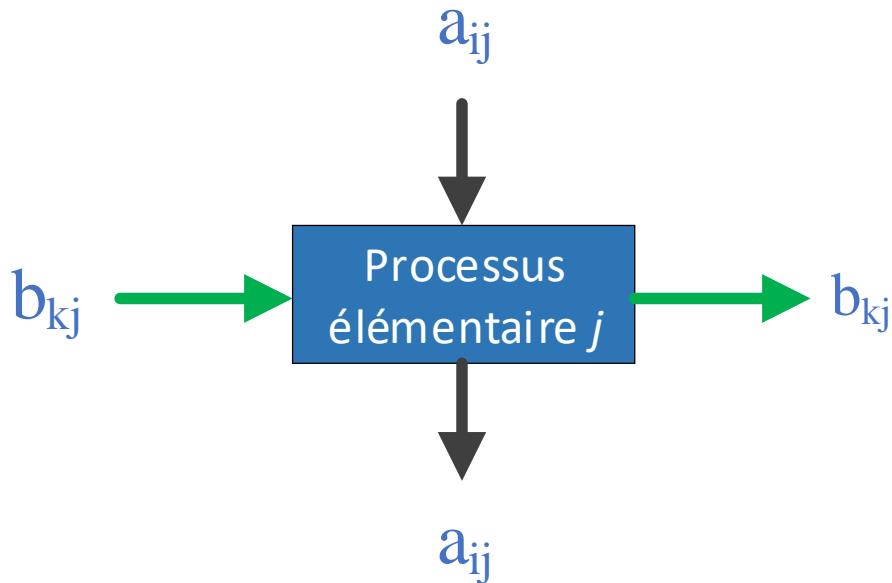


Figure 7 Processus élémentaire type et coefficients techniques

L'étape de recherche de données autonomes pour les différents processus élémentaires d'un système de produits est normalement l'étape la plus longue et difficile d'une ACV. L'information

³ Données d'inventaire qui ne sont pas encore mises à l'échelle de l'unité fonctionnelle.

nécessaire n'est pas toujours facile à trouver et comme il y a normalement plusieurs processus élémentaires, la recherche peut s'avérer très ardue.

Idéalement, il faudrait pouvoir *mesurer* les entrants et sortants de chacun des processus élémentaires. Par contre, cet idéal n'est pas réaliste pour plusieurs raisons :

- Alors qu'une entreprise peut mesurer ses propres entrants et sortants ainsi que ceux de l'étape d'utilisation de son produit, elle n'a habituellement pas les moyens de mesurer ceux de ses fournisseurs. Dans l'exemple de l'ampoule, on pourrait supposer que le fabricant peut mesurer ses propres émissions de CO₂, mais il ne peut pas mesurer les émissions de CO₂ de son fournisseur de composantes de cuivre.
- Les processus élémentaires représentés dans l'arbre de processus représentent eux-mêmes parfois un très grand nombre de processus élémentaires *agrégés*. Par exemple, les étapes de transport n'incluent pas uniquement les opérations d'un camion, mais aussi sa construction et son élimination en fin de vie, la construction et l'entretien des routes ou la production du diesel. Il serait impossible, dans le cadre d'une ACV sur une ampoule, de mesurer les émissions de CO₂ pour chacune de ces étapes.
- Parfois, il est impossible de connaître avec précision quelles entreprises sont associées à un processus élémentaire donné. Dans l'exemple, le papier d'emballage est acheté par l'entreprise chez un fournisseur qui l'achète sans doute lui-même sur le marché international.
- Certains produits sont fabriqués par un grand nombre de producteurs. Ainsi, une donnée impliquerait de mesurer les entrants et sortants de chacun de ces producteurs et d'en faire une moyenne pondérée. C'est le cas de l'électricité produite dans le système de produits ; l'électricité consommée à l'étape de production et d'utilisation provient d'un nombre élevé de centrales utilisant plusieurs technologies (hydroélectricité, centrales au charbon, centrales nucléaires, etc.).

Ainsi, il est normalement nécessaire de se rabattre sur d'autres sources de données pour quantifier les entrants et sortants des divers processus élémentaires d'un système de produits. Une méthode consiste à *calculer* ces entrants et sortants (par bilan de masse ou stœchiométrie).

Une autre méthode consiste à chercher des données appropriées dans la littérature : par exemple, il serait possible de trouver des données d'émissions de CO₂ pour le cycle de vie du papier dans le rapport d'une ACV effectuée sur ce sujet.

En ACV, les bases de données d'inventaire constituent des sources de données indispensables. Au fil des ans, les résultats d'inventaire sont entrés dans ces bases de données. Aujourd'hui, il en existe de nombreuses (Ecoinvent, Gabi, ELCD, USLCI, AusLCI...). La plus imposante est la base de données Ecoinvent, produite par le *Swiss Centre for Life Cycle*. Dans cette base de données, il est possible de retrouver l'inventaire du cycle de vie complet pour plus de 15 000 matériaux,

services et procédés. Ces inventaires tiennent compte de plus de 5 000 types de flux élémentaires, dont le CO₂.

Exemple de l'ampoule à incandescence

Étape 1 : Quantification des flux pour chaque processus élémentaire.

Dans l'exemple, il faut quantifier les flux économiques ainsi que les émissions de CO₂ pour chacun des processus élémentaires (individuellement) représentés dans l'arbre de processus.

- Assemblage et emballage de l'ampoule : Pour cette étape du cycle de vie, l'entreprise a entre les mains des données mesurées. En effet, elle sait qu'elle produit annuellement 5 000 000 ampoules (flux économique) et que, pendant cette même période de temps, elle produit 3 500 kg de CO₂ (flux élémentaire). Elle utilise aussi 75 T de composantes de cuivre, 100 T de verre et 50 T de papier d'emballage (tous des flux économiques). Ces données d'inventaire mesurées sont présentées à la Figure 8.

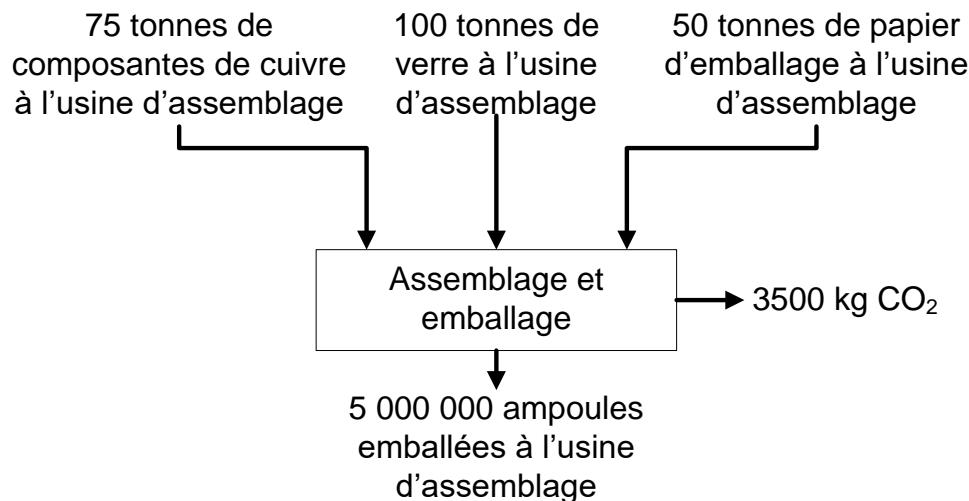


Figure 8 Flux économiques et élémentaires du processus assemblage et emballage de l'ampoule

Ces données autonomes peuvent être normalisées pour représenter les entrants et sortants par ampoule :

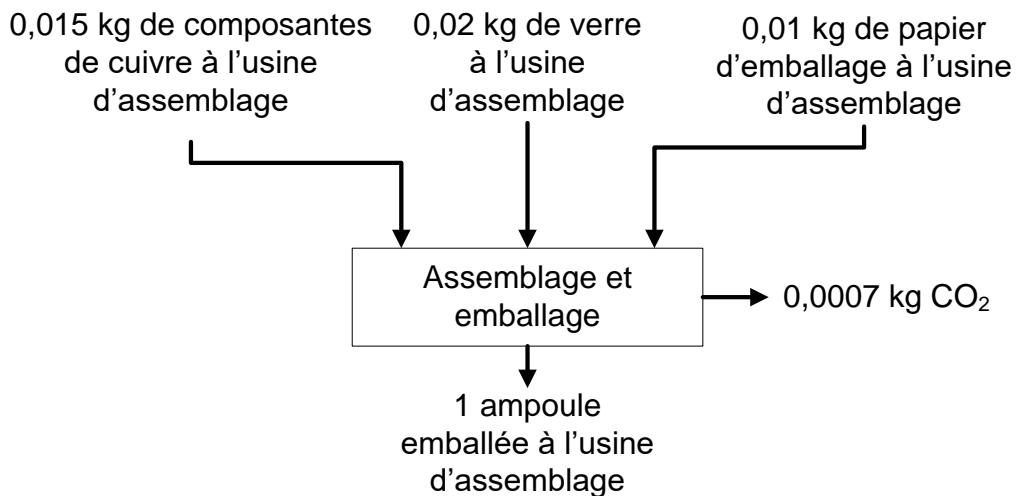


Figure 9 Données autonomes normalisées soit par ampoule

- Utilisation : L'étape d'utilisation n'émet pas de CO₂. Par contre, il est quand même nécessaire de quantifier les entrants et sortants de ce processus élémentaire (tous des flux économiques). Le premier entrant est bien sûr l'ampoule elle-même. L'autre entrant nécessaire est l'électricité consommée pour son fonctionnement. Le sortant est l'ampoule en fin de vie. Nous avons vu plus haut que l'ampoule a une durée de vie moyenne de 1000 heures et que sa consommation est de 60 W. Nous avons donc les données autonomes suivantes :

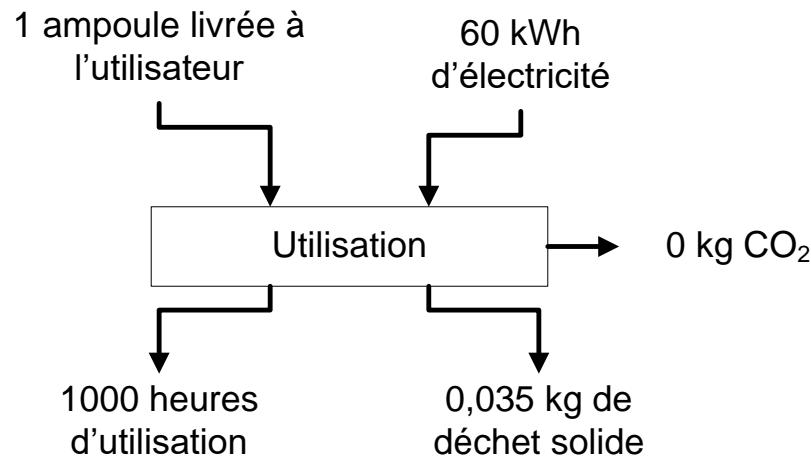


Figure 10 Flux économiques et élémentaires du processus utilisation

Le 0,035 kg de déchet fait référence à l'ampoule en fin de vie. Pour faciliter la manipulation, il est plus utile de représenter cette donnée par unité de fonction, c'est-à-dire par heure d'utilisation. Nous avons donc :

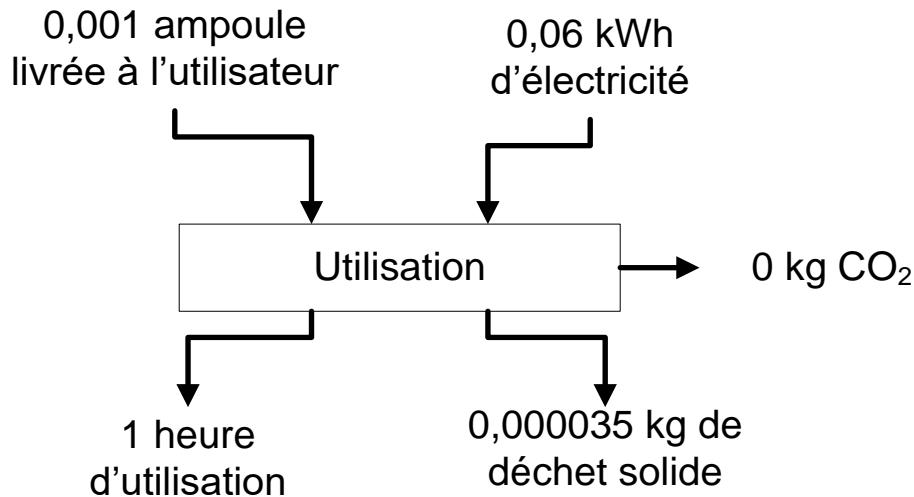


Figure 11 Flux économiques et élémentaires normalisés du processus utilisation

Pour les autres données, nous utiliserons la base de données Ecoinvent.

- Extraction de cuivre et production des composantes de cuivre : La base de données Ecoinvent contient une donnée pour la production de cuivre. Cette donnée d'inventaire tient compte de toutes les étapes du cycle de vie du cuivre, de l'extraction du minerai jusqu'à la livraison à l'usine d'assemblage d'ampoules, en passant par les étapes de raffinage du cuivre, de production et d'entretien de la machinerie, de la production de diesel, etc. Ce genre de donnée est appelé une donnée « agrégée » parce qu'elle tient compte de plusieurs processus élémentaires. C'est aussi une donnée « berceau à la barrière » (cradle to gate en anglais), puisqu'elle tient compte de tous les processus en amont (incluant la production du cuivre mais excluant son utilisation et sa fin de vie).

Il est supposé ici que les émissions de CO₂ associées à la production des composantes de cuivre sont négligeables comparées aux émissions associées à sa production. Les données autonomes sont représentées à la Figure 12 suivante :

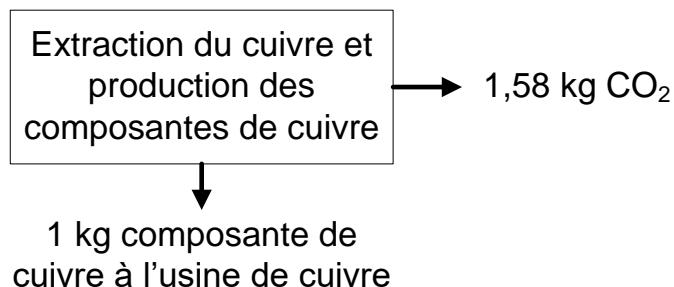


Figure 12 Flux économiques et élémentaires du processus extraction et production des composantes de cuivre

- Production du verre : Encore une fois, ce processus élémentaire est en fait composé de toutes les étapes du cycle de vie de la production du verre, de l'extraction des ressources naturelles jusqu'au verre prêt à être livré à l'usine d'assemblage d'ampoules. Les données autonomes « berceau à la barrière » provenant de Ecoinvent pour la production de verre sont les suivantes :

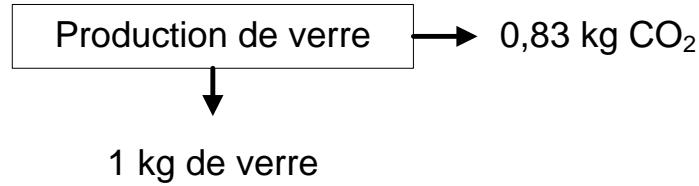


Figure 13 Flux économiques et élémentaires du processus production du verre

- Production du papier d'emballage : Les données autonomes « berceau à la barrière » de Ecoinvent pour la production de papier d'emballage kraft non-blanchi sont les suivantes :

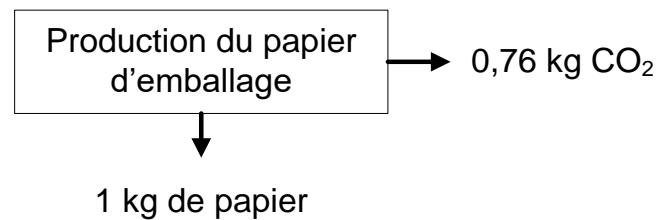


Figure 14 Flux économiques et élémentaires du processus production du papier d'emballage

- Production d'électricité : Chaque technologie utilisée pour générer de l'électricité (hydroélectricité, nucléaire, centrale au charbon, etc.) génère différentes quantités d'émissions de CO₂. La base de données Ecoinvent contient une donnée d'inventaire pour les émissions moyennes de CO₂ en Europe, qui tient compte des différentes filières de production d'électricité et de leur contribution relative à la totalité de l'électricité produite. En moyenne, la production d'électricité en Europe génère 0,51 kg de CO₂ par kWh :

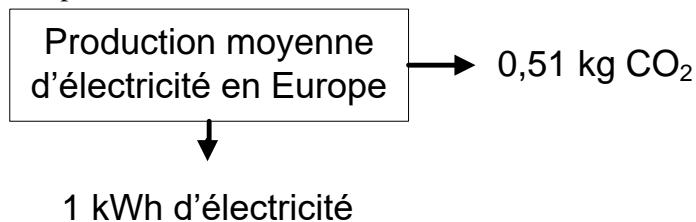


Figure 15 Flux économiques et élémentaires du processus production d'électricité

- Enfouissement : L'enfouissement des matières résiduelles dans un lieu d'enfouissement sanitaire requiert plusieurs activités émettant du CO₂ : excavation du site, transport des sols excavés, imperméabilisation du site, gestion du site, etc. La base de données Ecoinvent fournit les données autonomes moyennes pour l'enfouissement de déchets inertes dans un lieu d'enfouissement sanitaire :

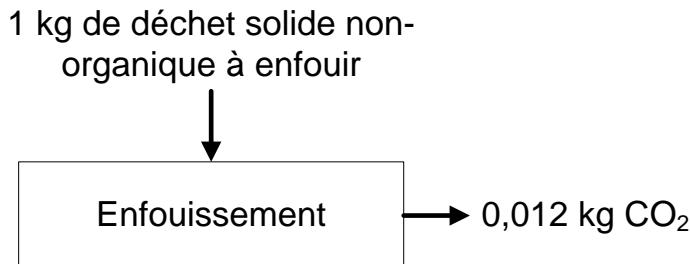


Figure 16 Flux économiques et élémentaires du processus d'enfouissement

- Transport par camion : Le système de produits contient un total de cinq étapes de transport. En ACV, les données d'inventaire relatives au transport sont normalement exprimées en émissions par tonne*km (tkm), c'est-à-dire pour le transport d'une tonne de bien sur une distance de 1 kilomètre. L'unité tkm est obtenue en multipliant le poids de biens à transporter par la distance donc le transport de 2 tonnes sur 100 km (200 tkm) est équivalent, en termes de données d'inventaire, au transport de 500 kg sur 400 km. Les données autonomes par tkm pour le transport (qui inclut les opérations du camion et également sa construction et sa fin de vie, la construction des routes, etc.) sont les suivantes :

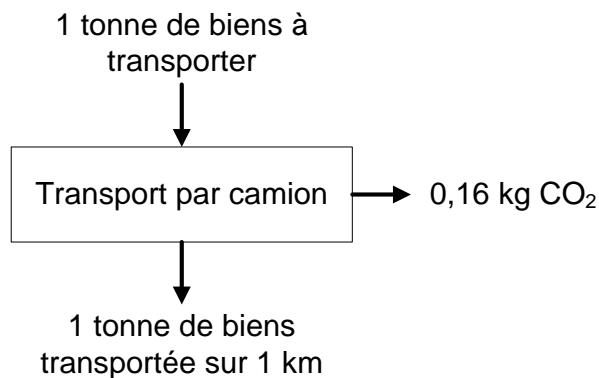


Figure 17 Flux économiques et élémentaires du processus transport par camion

Ces données issues d'Ecoinvent sont résumées au Tableau 1 suivant :

Tableau 1 Émissions de CO₂ par processus élémentaire pour l'ampoule à incandescence

Processus élémentaire	Données
Production de cuivre	1,58 kg CO ₂ /kg de cuivre
Production de verre	0,83 kg CO ₂ /kg de verre
Production de papier	0,76 kg CO ₂ /kg de papier
Production d'électricité	0,51 kg CO ₂ /kWh d'électricité
Enfouissement	0,012 kg CO ₂ /kg enfouis
Transport	0,16 kg CO ₂ /tkm de transport

Nous avons maintenant les données d'inventaire autonomes pour chacun des processus élémentaires du système de produits.

c. Étape 2 : Mise à l'échelle des processus élémentaires au flux de référence

Comme mentionné plus haut, cette étape consiste à déterminer dans quelle mesure chaque processus élémentaire est sollicité dans l'objectif de remplir l'unité fonctionnelle. Nous ne tenons compte à cette étape que des *flux économiques*. Chacune des données autonomes trouvées à l'étape 1 doit être multipliée par un facteur de *mise à l'échelle*. Le résultat de cette étape est un *inventaire de production*⁴.

La procédure commence par la mise à l'échelle des processus élémentaires fournissant la fonction à l'étude et les flux de référence. Nous déterminons ainsi combien de produits intermédiaires produits par d'autres processus élémentaires sont nécessaires – nous mettons donc ces derniers à l'échelle. Il s'agit donc simplement de bilans de masse ou d'énergie successifs. La même procédure est appliquée jusqu'à ce que chaque processus élémentaire du système de produits soit normalisé à l'unité fonctionnelle.

Exemple de l'ampoule à incandescence

Étape 2 : Mise à l'échelle des processus élémentaires au flux de référence.

L'unité fonctionnelle et les flux de références ont été calculés lors de la première phase de l'ACV et permettent déjà de mettre à l'échelle certains processus élémentaires :

- Nous avons comme unité fonctionnelle l'*éclairage de 600 lumens pendant 100 heures*. La donnée autonome trouvée à l'étape 1 est pour une heure d'éclairage. Le facteur de mise à l'échelle est donc égale à 100 :

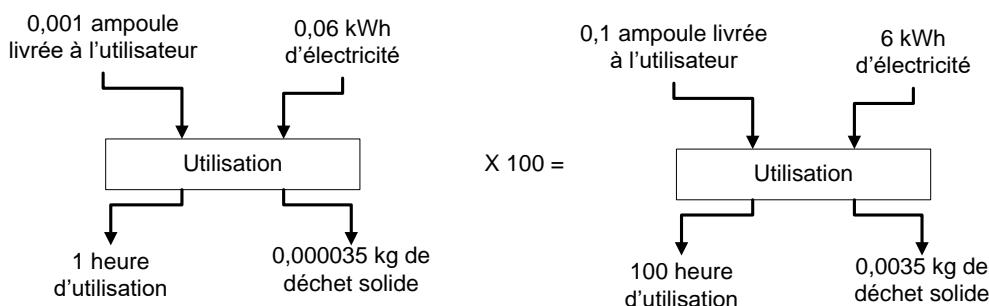


Figure 18 Mise à l'échelle des flux économiques et élémentaires du processus utilisation

- Le flux de référence de 6 kWh/unité fonctionnelle permet de mettre à l'échelle le processus élémentaire de production d'électricité avec un *facteur de mise à l'échelle* de 6 :

⁴ Inventaire de flux économiques. Regroupe l'ensemble des produits, matériaux, flux d'énergie et services nécessaires tout au long du cycle de vie du produit, pour répondre à l'unité fonctionnelle.

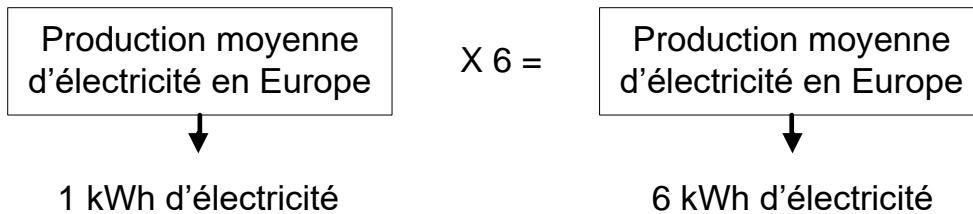


Figure 19 Mise à l'échelle des flux économiques et élémentaires du processus production d'électricité

- Le flux de référence de 0,1 ampoule/unité fonctionnelle permet directement de mettre à l'échelle le processus élémentaire d'assemblage et d'emballage avec un facteur de mise à l'échelle 0,1.

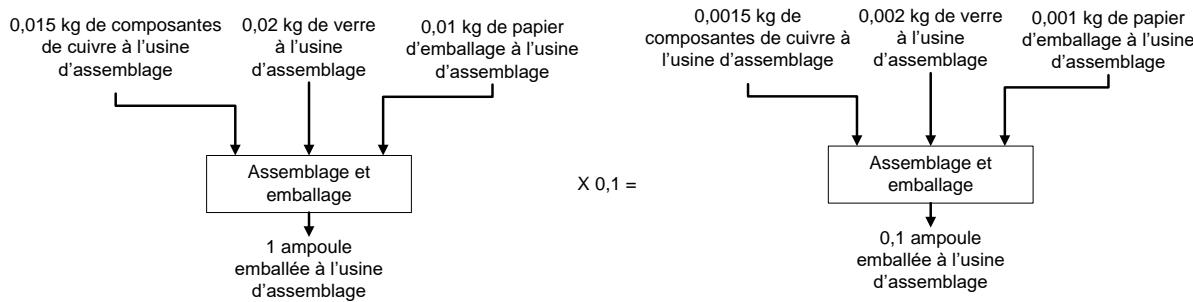


Figure 20 Mise à l'échelle des flux économiques et élémentaires du processus assemblage et emballage

- Mise à l'échelle de l'enfouissement : Du processus élémentaire d'utilisation mis à l'échelle, on voit que nous devons enfouir 0,0035 kg de déchet solide/UF. Nous avons donc un facteur de mise à l'échelle de 0,0035 :

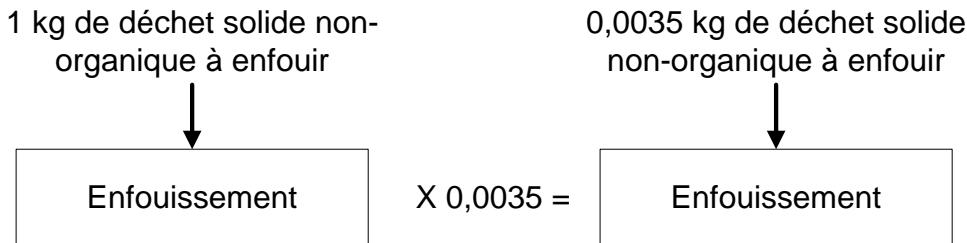


Figure 21 Mise à l'échelle des flux économiques et élémentaires du processus enfouissement

Maintenant que nous avons mis à l'échelle tous les processus élémentaires directement associés aux flux de référence, on peut procéder à la mise à l'échelle des autres processus élémentaires : (1) les processus élémentaires produisant les entrants nécessaires à l'assemblage et l'emballage de l'ampoule et (2) les diverses étapes de transport.

- Processus élémentaires produisant les entrants nécessaires à l'assemblage et l'emballage de l'ampoule. De la mise à l'échelle du processus élémentaire d'assemblage et d'emballage de l'ampoule, nous lisons directement que nous avons besoin de 0,0015 kg de cuivre, 0,002 kg de verre et 0,001 kg de papier. Les facteurs de mise à l'échelle sont donc de 0,002, 0,0015 et 0,001, respectivement pour le cuivre, le verre et le papier.

- Transport : Le transport est exprimé en tonne*km (tkm). Le facteur de mise à l'échelle de chacune des étapes de transport se calcule donc en multipliant la distance de transport par la masse transportée. Nous avons donc les facteurs de mise à l'échelle suivants :
 - Transport du cuivre vers le producteur d'ampoules :
 - $0,0015 \text{ kg} * 200 \text{ km} = 0,0003 \text{ tkm}$
 - Transport du verre vers le producteur d'ampoules :
 - $0,002 \text{ kg} * 5\text{km} = 0,0001 \text{ tkm}$
 - Transport du papier vers le producteur d'ampoules :
 - $0,001 \text{ kg} * 50\text{km} = 0,0005 \text{ tkm}$
 - Transport des ampoules emballées vers les utilisateurs (distribution) :
 - $(0,0015 \text{ kg} + 0,002 \text{ kg} + 0,001 \text{ kg}) * 50\text{km} = 0,0023 \text{ tkm}$
 - Transport des ampoules en fin de vie vers le lieu d'enfouissement sanitaire :
 - $(0,0015 \text{ kg} + 0,002 \text{ kg}) * 100\text{km} = 0,0035 \text{ tkm}$

Au total, il y a donc 0,0067 tkm de transport.

Tous les processus élémentaires du système de produits sont maintenant mis à l'échelle. Il est possible de représenter l'ensemble de ces résultats par le diagramme d'inventaire de production suivant :

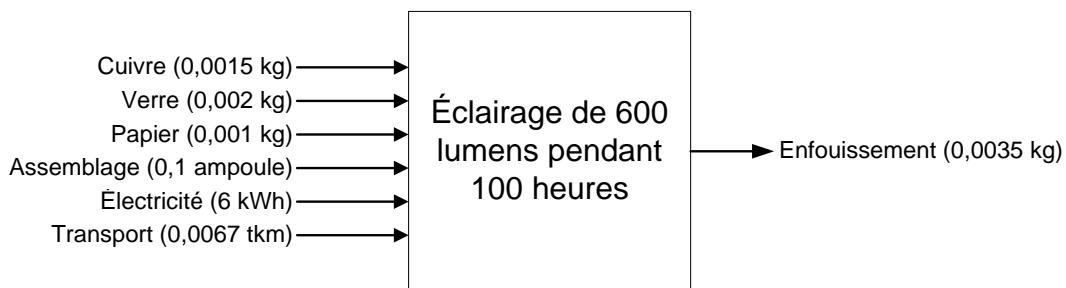


Figure 22 Résultat de la mise à l'échelle de tous les processus élémentaires du système

d. Étape 3 : Calcul des flux élémentaires pour chaque processus élémentaire

À l'étape 1 de l'inventaire, nous déterminons, pour chaque processus élémentaire les entrants et sortants (flux économiques et élémentaires). Les *flux économiques* trouvés à cette étape sont utiles pour calculer l'inventaire de production (étape 2). À l'étape 3, les résultats de l'inventaire de production et les informations sur les *flux élémentaires* de l'étape 1 sont utilisés pour calculer les flux élémentaires normalisés de chaque processus élémentaire.

Exemple de l'ampoule à incandescence

Étape 3 : Calcul des flux élémentaires pour chaque processus élémentaire.

À l'étape 2, nous avons calculé la quantité de chacun des types de flux économiques nécessaires pour remplir l'unité fonctionnelle. Nous savons aussi, avec les données autonomes de l'étape 1, combien de CO₂ est émis par unité de flux économique. Le calcul d'émission de CO₂ pour chaque processus élémentaire consiste simplement en la multiplication de ces deux données :

Tableau 2 Émissions normalisées par unité fonctionnelle et par processus élémentaire

Processus élémentaire	Quantité requise (étape 2)	Émission par unité produite (étape 1)	Émissions normalisées (kg CO ₂ /UF)
Production des composantes de cuivre	0,0015 kg	1,58 kg CO ₂ /kg	2.37 *10 ⁻³
Production du verre	0,002 kg	0,83 kg CO ₂ /kg	1.66 *10 ⁻³
Production du papier d'emballage	0,001 kg	0,76 kg CO ₂ /kg	7.60 *10 ⁻⁴
Assemblage de l'ampoule	0,1 ampoule	0,0007 kg CO ₂ / ampoule	7.00 *10 ⁻⁵
Utilisation	100 heures	0 kg CO ₂ /heure	0
Production d'électricité	6 kWh	0,51 kg CO ₂ /kWh	3,06
Enfouissement	0,0035 kg	0,012 kg CO ₂ /kg	4.20 *10 ⁻⁵
Transport	0,0067 tkm	0,16 kg CO ₂ /tkm	1.07 *10 ⁻³

Le cycle de vie de l'éclairage à 600 lumens pendant 100 heures entraîne donc des émissions de 2,37 g de CO₂ associées au cuivre dans l'ampoule, des émissions de 1,66 g de CO₂ associées au verre dans l'ampoule, des émissions de 0,76 g de CO₂ associées à l'emballage de l'ampoule, etc.

e. Étape 4 : Somme des flux élémentaires émis par l'ensemble du cycle de vie

Connaissant maintenant la quantité de CO₂ émis par chaque processus élémentaire par unité fonctionnelle, on peut connaître la quantité totale de CO₂ émis par le système de produits en faisant tout simplement la somme.

Exemple de l'ampoule à incandescence

Étape 4 : Somme des flux élémentaires émis par l'ensemble du cycle de vie.

La somme des émissions calculées à l'étape 3 est de **3,066 kg CO₂/unité fonctionnelle**.

f. Analyse de contribution

L'analyse de contribution sert à évaluer la contribution relative de chacune des étapes ou des processus élémentaires du cycle de vie d'un produit ou service. Ainsi, il est possible de savoir quelles sont les activités particulièrement problématiques, ce qui permet de bien cibler les efforts d'amélioration environnementale. En effet, il est évidemment préférable de focaliser les ressources humaines et financières sur les activités du cycle de vie les plus contributrices au lieu des moins.

Exemple de l'ampoule à incandescence

Analyse de contribution

Une analyse de contribution peut se faire au niveau des processus élémentaires individuels ou au niveau des étapes du cycle de vie. Dans le cas de l'ampoule, nous allons calculer la contribution des étapes du cycle de vie, définies comme suit :

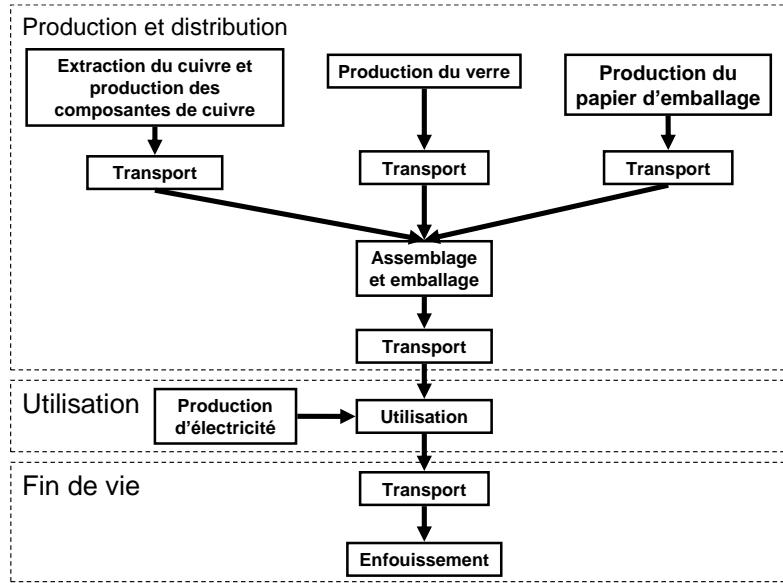


Figure 23 Étapes du cycle de vie du système étudié

Production et distribution : pour les processus élémentaires de l'étape production et distribution, les émissions de CO₂/UF sont repris dans le Tableau 3. Cette étape contribue donc à $(0,005372/3,066) = 0,18\%$ des émissions totales du cycle de vie de l'ampoule.

Tableau 3 Contribution par unité fonctionnelle des processus élémentaires

Processus élémentaire	kg CO ₂ /UF
Production des composantes en cuivre	0.00237
Transport des composantes en cuivre	0.000048
Production du verre	0.00166
Transport du verre	0.000016
Production du papier	0.00076
Transport du papier	0.00008
Assemblage et emballage	0.00007
Distribution	0.000368
Total	0.005372

- Utilisation : le processus élémentaire « utilisation » ne génère aucune émission de CO₂. Par contre, il existe des émissions égales à 3,06 kg CO₂/UF pour la production d'électricité nécessaire à l'utilisation de l'ampoule. La contribution de cette étape du cycle de vie est donc égale à $(3,06/3,066) = 99,8\%$.
- Fin de vie : pour les processus élémentaires de cette étape du cycle de vie, les émissions de CO₂, par unité fonctionnelle sont ; le transport de l'ampoule brûlée qui contribue à 0,000056 kg CO₂/UF et son enfouissement en LES qui contribue à 0,000042 kg CO₂/UF. Ainsi, l'étape de fin de vie contribue donc à $(0,0006/3,066) = 0,02\%$ des émissions totales du cycle de vie de l'ampoule.

Il est donc à constater que l'étape d'utilisation domine les émissions de CO₂ du cycle de vie de l'ampoule, entièrement associée à la consommation d'énergie électrique. Ceci permet d'affirmer que cette phase est

prioritaire pour améliorer les émissions de CO₂ de l'ampoule. C'est pourquoi, il a été envisagé de concevoir une ampoule à plus faible consommation d'électricité, comme les ampoules fluocompactes, ou encore s'assurer que la source d'électricité soit plus propre.

g. Qualité des données

Comme il l'a été mentionné précédemment, plusieurs sources de données peuvent être utilisées pour la quantification des flux d'un processus élémentaire (mesures, bases de données, calculs, etc.) cependant, il arrive souvent que la donnée disponible ne soit pas la plus adaptée.

Par exemple, nous voulons refaire l'inventaire de CO₂ pour une ampoule à incandescence produite et utilisée au Canada. La majorité des données utilisées pour l'inventaire ci-dessus venait de la base de données européenne Ecoinvent, ce qui peut entraîner des erreurs. Notamment, la donnée sur la production d'électricité de Ecoinvent tenait compte du mélange énergétique (*grid mix*) européen, qui comprend environ 55% d'électricité à base de combustibles fossiles (pétrole, charbon et gaz naturel), 30% de nucléaire et 10% d'hydroélectricité. Au Canada, le *grid mix* est complètement différent : 26% de combustibles fossiles, 12% de nucléaire et 60% d'hydroélectricité. Les émissions de CO₂ par kWh d'électricité au Canada seront donc de toute évidence beaucoup moins élevées en raison de l'hydroélectricité (de l'ordre de 0,18 kg CO₂/kWh).

Cet exemple démontre l'importance de tenir compte de la qualité des données utilisées lors de la réalisation d'un inventaire. Il est donc nécessaire de tenir compte de :

- La fiabilité des données : est-ce que la source de données est fiable ? Est-ce que la donnée est basée sur suffisamment de mesures pour qu'elle soit statistiquement solide ?
- La validité des données : est-ce que la donnée représente la même technologie que celle utilisée dans la réalité ? Est-ce que l'âge des données est appropriée (ex. : une donnée de 20 ans pour représenter un processus élémentaire actuel) ? Est-ce que la région représentée par la donnée et celle concernant l'étude est la même (ex. : une donnée pour un produit fabriqué en Europe utilisée pour la production du même produit en Chine) ?

Dans une ACV complète, il est important de définir le niveau de qualité des données souhaité. Pour une ACV utilisée à l'interne, ayant comme objectif de donner un bref aperçu des impacts d'un produit, il est possible que des données de faible qualité soient acceptables, alors que pour une ACV dont les résultats seront divulgués au public, la qualité des données devra être plus grande. Il est aussi important de bien spécifier dans le rapport d'une ACV complète la différence entre les exigences en termes de qualité des données et celle des données qui ont véritablement été utilisées.

5. Phase 3 de l'ACV : Évaluation des impacts du cycle de vie (EICV)

a. Introduction à l'EICV

La phase d'EICV est la troisième phase de l'ACV. Son objectif consiste à évaluer la portée des impacts environnementaux potentiels en utilisant les résultats de l'inventaire du cycle de vie. Elle constitue un processus quantitatif et qualitatif qui permet d'identifier, de caractériser puis d'évaluer les impacts environnementaux potentiels des substances identifiées lors de l'inventaire.

Selon (ISO, 2006b), les éléments obligatoires de l'évaluation des impacts du cycle de vie sont :

- La sélection des catégories d'impacts, des indicateurs de catégories et des modèles de caractérisation ;
- L'affectation des résultats de l'inventaire du cycle de vie aux catégories d'impact sélectionnées (classification) ;
- Le calcul des résultats d'indicateurs de catégorie (caractérisation).

D'après (Joliet, O.; Saadé, M.; Crettaz, P.; Shaked, 2017), le but de l'analyse des impacts est de relier les données de l'inventaire aux dommages environnementaux causés. Ainsi, il est nécessaire de grouper les résultats d'inventaire ayant des effets similaires (destruction de la couche d'ozone, acidification aquatique, eutrophisation aquatique...) dans des catégories d'impact appelées catégories intermédiaires. Par la suite, afin d'augmenter l'agrégation des résultats, il est possible de relier ces catégories intermédiaires entre elles selon les dommages qu'elles engendrent.

Après avoir effectué l'inventaire, des centaines de sortants et entrants peuvent avoir été identifiés, il est alors nécessaire de quantifier la contribution qu'ont ces substances et ressources dans les différentes catégories environnementales.

b. Classification

La première étape de l'EICV est donc la classification. Étant donné qu'elles engendrent des effets différents, les substances ne peuvent pas être comparées entre elles et il est donc nécessaire de leur trouver une base commune de comparaison. Cette base commune est l'impact environnemental et la classification permet de, **qualitativement**, faire regrouper des flux élémentaires dans les catégories de problématiques environnementales selon les effets qu'elles y causent. Les substances sont reliées aux catégories de problèmes et dommages selon leur chaîne de cause-effet avérée. Par exemple, dans le cas des changements climatiques, les émissions de GES provoquent des effets multiples allant jusqu'à l'atteinte aux écosystèmes et à la santé humaine :

- i. Émissions de GES (résultats de l'inventaire)
- ii. Perturbation du bilan des radiations
- iii. Augmentation de la température globale
- iv. Augmentation du niveau des mers due à la dilatation des eaux, fonte des glaces, migration d'espèces
- v. Atteintes aux écosystèmes et à la santé humaine

Ainsi, tous les intrants et sortants ont été classifiés selon leur chaîne de cause à effet et répertoriés dans les catégories correspondant à l'impact causé. Les catégories d'impacts diffèrent selon la méthode d'EICV choisie. La Figure 24, ci-dessous, montre le résultat de la classification dans les catégories d'impacts de différentes substances identifiées lors de l'ICV.

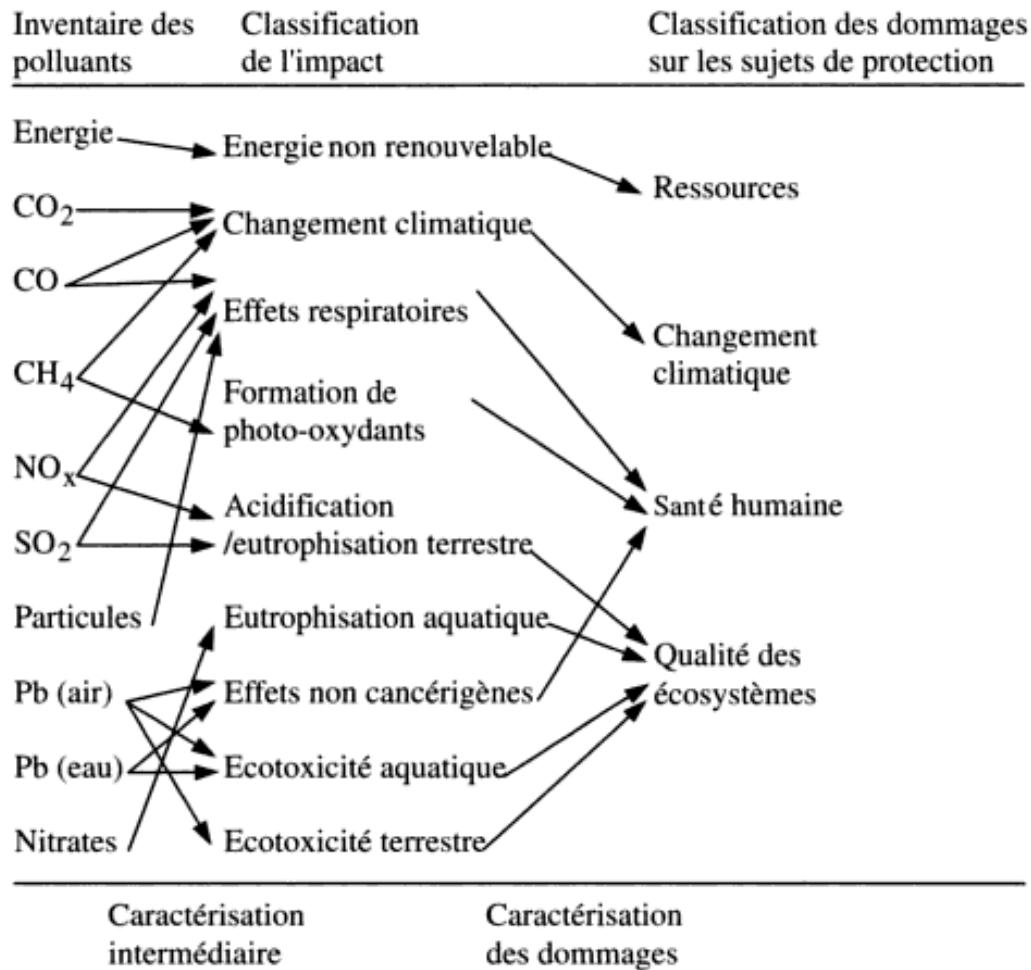


Figure 24 Exemples de classification de quelques substances

c. Caractérisation

La caractérisation permet, à la suite de la classification, de mesurer **quantitativement** la contribution des substances aux catégories d'impacts auxquelles elles sont associées. Chaque catégorie possède une unité qui lui est propre et toutes les substances classifiées dans la même catégorie sont rapportées à cette unité par le biais d'un **facteur de caractérisation** qui leur est propre. Ceci permet ainsi de pouvoir les comparer selon une base commune et d'identifier la substance contribuant le plus à l'impact.

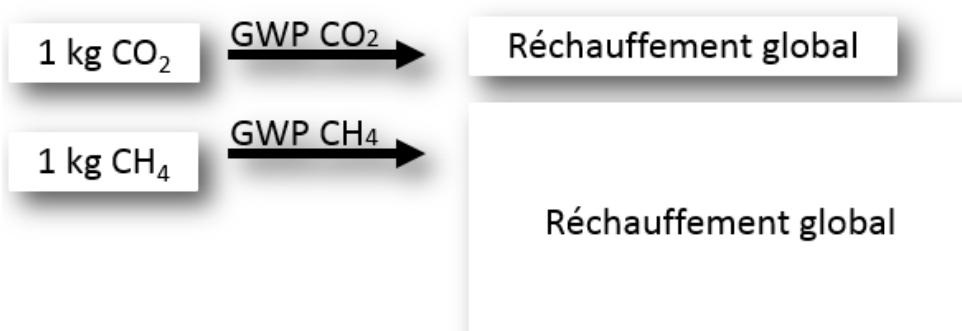
Les résultats sont alors obtenus par catégories d'impacts et représentent les impacts potentiels du produit ou service évalué. Il est important de comprendre que ce ne sont pas des impacts réels qui sont évalués mais bien une valeur potentielle. Les résultats obtenus ne reflètent pas une mesure ou

un dépassement de taux avéré mais une valeur moyenne probable d'impacts. C'est en ce sens que l'ACV se distingue, par exemple, de l'analyse de risques. De plus, il faut retenir que les résultats sont toujours exprimés en fonction de l'unité fonctionnelle choisie, c'est pourquoi très peu d'attention sera portée sur la valeur propre des impacts mais plus sur les tendances et l'identification des contributeurs majeurs à cette valeur.

Afin de quantifier l'importance relative des émissions et des extractions d'une substance sur une catégorie définie, les méthodes font appels à des facteurs de caractérisations (intermédiaires pour les catégories *mid-point* et de dommages pour les catégories *end-point*). Lors du passage de l'inventaire en impacts intermédiaires, la modélisation de l'impact environnemental se fait en multipliant les masses émises des substances (ou extraites des ressources) par leur facteur de caractérisation intermédiaire puis en les sommant afin d'obtenir un score d'impact intermédiaire. Pour le passage d'intermédiaires à dommages, il suffit de répéter la manipulation, cette fois-ci en multipliant les facteurs de caractérisations de dommages et les scores d'impact intermédiaires puis en les sommant afin d'obtenir le score de caractérisation de dommages. Quand le système est relativement simple, ces étapes peuvent se faire à l'aide d'un calcul matriciel mais dès que les processus unitaires sont trop nombreux, il est préférable de procéder à l'aide de logiciels de modélisation tels SimaPro ou Gabi.

La caractérisation permet de caractériser les entrants et sortants en fonction du degré auquel ils contribuent à un impact. Un facteur de caractérisation est affecté à chaque substance et il représente le pouvoir d'impact qu'a la substance dans la catégorie à laquelle elle est associée. Pour les changements climatiques, par exemple, il a été prouvé scientifiquement que le méthane (CH_4) contribue au réchauffement global de manière plus importante que le dioxyde de carbone (CO_2) pour la même quantité de substance émise (Tableau 4). En résulte alors un facteur de caractérisation plus important pour le méthane et afin d'obtenir le score d'impact de la substance dans la catégorie changements climatiques, ce facteur de caractérisation est multiplié par la quantité de substance émise à l'atmosphère (voir Figure 25).

Contribution globale au réchauffement global:



$$S(\text{kg CO}_{2\text{eq}}) = \sum GWP_i \times \text{Qté de la substance(i) émise(kg)}$$

Figure 25 Contribution au réchauffement climatique du CO_2 et du CH_4

Ces facteurs de caractérisation ont été établis selon un modèle de caractérisation pour convertir les résultats de l'ICV en unité de référence de la catégorie d'impact. La formule ci-dessus est alors généralisée pour l'ensemble des substances et l'ensemble des catégories d'impacts :

$$S_i = \sum FC_{s,i} * M_s$$

Avec M_s la masse de la substance s, $FC_{s,i}$ le facteur de caractérisation de la substance s pour la catégorie d'impact i et S_i le score d'impact de la substance s dans la catégorie d'impact i.

L'obtention des facteurs de caractérisation est le fruit d'années de travail scientifique complexe relevant d'une grande variété de corps de métiers comme les écologistes, les médecins, les toxicologues, les climatologues, etc. Par exemple, pour la caractérisation des GES, les facteurs utilisés (voir Tableau 4) proviennent du rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC).

Tableau 4 Facteurs de caractérisations de certains GES*

Facteurs de caractérisation		
Substance	GWP 100a (kg éq. CO ₂)	GWP 500a (kg éq. CO ₂)**
Dioxyde de carbone (CO ₂)	1	1
Méthane (CH ₄)	28	7,6
Protoxyde d'azote (N ₂ O)	265	156
Hexafluorure de soufre (SF ₆)	23 500	32 400
Monoxyde de carbone (CO)	-	1,57
<i>Chlorofluorocarbures</i>		
CFC-10 (CCl ₄)	1 730	580
CFC-12 (CCl ₂ F ₂)	10 200	5 200
CFC-14 (CF ₄)	6 630	8 900
CFC-113 (C ₂ Cl ₃ F ₃)	5 820	2 700
CFC-114 (C ₂ Cl ₂ F ₄)	8 590	8 700
<i>Hydrochlorofluorocarbures</i>		
HCFC-22 (CHClF ₂)	1 760	540
HCFC-124 (CHClFCF ₃)	527	190
<i>Hydrofluorocarbures</i>		
HFC-23 (CHF ₃)	12 400	10 000
HFC-116 (C ₂ F ₆)	11 100	18 000
HFC-134a (CH ₂ FCF ₃)	1 300	400
HFC-143a (CH ₃ CF ₃)	4 800	1 600
HFC-152a (C ₂ H ₄ F ₂)	138	37
<i>Halons</i>		
Halon 1211	1 750	390
Halon 1301	6 290	2 700

*Données non exhaustives tirées de (Myhre et al., 2013)

**IMPACT 2002+ utilise les facteurs sur 500 ans

À la suite de la caractérisation, les résultats obtenus peuvent être représentés sous forme d'histogrammes où les impacts des produits modélisés sont donnés par catégorie intermédiaire relativement au système ayant le plus d'impact dans cette catégorie. Dans l'exemple de la Figure 26, une ACV comparative, utilisant la méthode IMPACT 2002+, a été effectuée sur le type de matériau à privilégier pour le bloc avant d'une automobile. Les résultats obtenus ne vont pas dans un sens unique quant au matériau à choisir, cependant il est constaté que l'aluminium recyclé a le meilleur profil environnemental des quatre matériaux étudiés pour 12 des 15 catégories. Le composite possède un meilleur profil environnemental pour les 3 autres catégories (Radiations ionisantes, Écotoxicité aquatique et Extraction de minerais). Le bloc en acier est, pour 11 catégories, le matériau le plus dommageable tandis que le bloc en aluminium l'est pour les 4 autres catégories (Non-cancérogènes, Radiations ionisantes, Écotoxicité aquatique et Extraction de minerais).

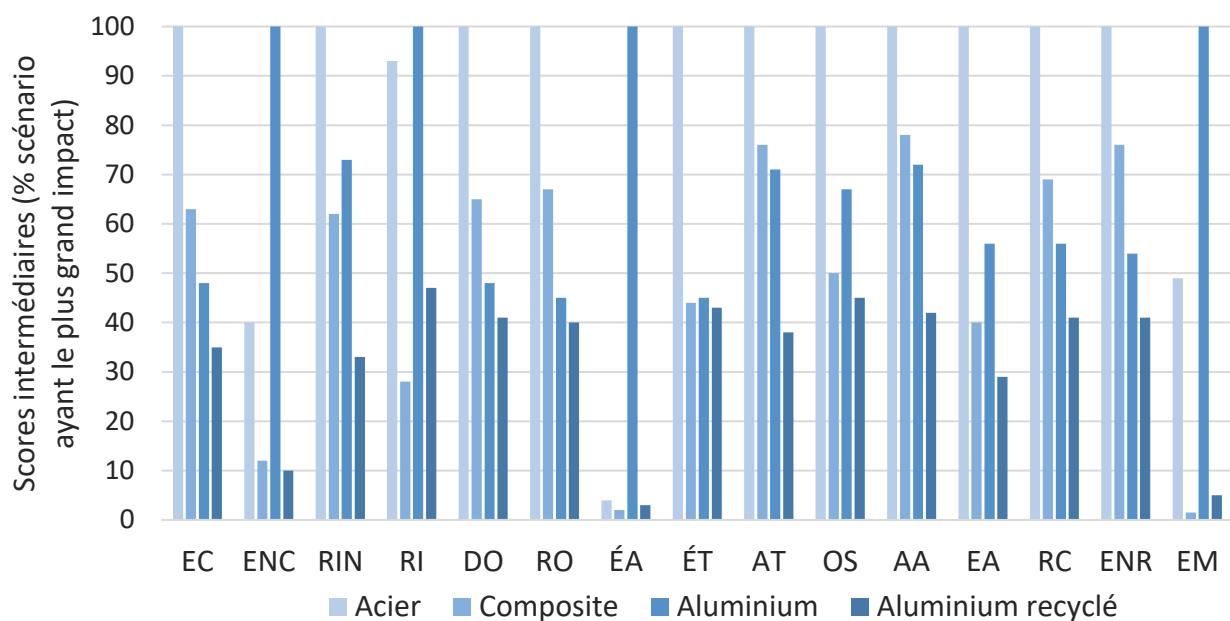


Figure 26 Catégories problèmes d'une ACV comparative de matériaux pour un bloc avant d'une auto
(Tiré de Jolliet et al. 2010)

EC : Effets cancérigènes ; ENC : Effets non-cancérigènes ; RIN : Respiratoires inorganiques ; RI : Radiations ionisantes ; DO : Déplétion de la couche d'ozone ; RO : Respiratoires organiques ; ÉA : Écotoxicité aquatique ; ÉT : Écotoxicité terrestre ; AT : Acidification terrestre ; OS : Occupation des sols ; AA : Acidification aquatique ; EA : Eutrophisation aquatique ; RC : Réchauffement climatique ; ENR : Énergie non renouvelable ; EM : Extraction des minerais

La caractérisation selon les catégories d'impacts problèmes (ou *mid-point*) est la première agrégation qui est effectuée sur les substances ayant un effet similaire. Par la suite, il est possible d'agréger à un niveau supplémentaire ces catégories d'impacts problèmes. Il s'agit alors de caractériser chacune des catégories selon le dommage qu'elle cause afin d'obtenir un score de dommage (ou *end-point*). L'agrégation reflète les dommages similaires causés par les problèmes environnementaux. Dans le cas de la méthode IMPACT 2002+, quatre catégories d'impact dommages sont caractérisées. L'obtention de résultats selon la caractérisation dommage permet

de rendre l'interprétation et la communication des résultats plus faciles. Cependant, en effectuant cette agrégation, l'incertitude des résultats est augmentée, car les facteurs utilisés (voir Tableau 5) possèdent un certain degré d'incertitude, et la quantité d'informations disponibles relativement aux impacts environnementaux causés par le système ou le produit est réduite faisant en sorte qu'il se peut que des conclusions ou remarques pertinentes soient omises.

Tableau 5 Facteurs de dommage de la méthode IMPACT 2002+

Catégorie intermédiaire	Unité	Facteur de dommage
Toxicité Humaine (cancérogène)	[DALY/kg chlorure de vinyle éq.]	$2,80 \times 10^{-6}$
Toxicité Humaine (non cancérogène)	[DALY/kg chlorure de vinyle éq.]	$2,80 \times 10^{-6}$
Respiratoire organique	[DALY/kg éthylène éq.]	$2,13 \times 10^{-6}$
Respiratoire inorganique	[DALY/kg PM _{2,5} éq.]	$7,00 \times 10^{-4}$
Destruction de la couche d'ozone	[DALY/kg CFC-11 éq.]	$1,05 \times 10^{-3}$
Radiation ionisante	[DALY/Bq C-14 éq.]	$2,10 \times 10^{-10}$
Écotoxicité aquatique	[PDF.m ² .an/kg TEG éq.]	$5,02 \times 10^{-5}$
Écotoxicité terrestre	[PDF.m ² .an/kg TEG éq.]	$7,91 \times 10^{-3}$
Acidification/Eutrophisation terrestre	[PDF.m ² .an/kg SO ₂ éq.]	1,04
Acidification aquatique	[kg SO ₂ /kg SO ₂ éq.]	En développement
Eutrophisation aquatique	[kg PO ₄ ³⁻ éq./kg PO ₄ ³⁻ éq.]	En développement
Occupation des sols	[PDF.m ² .an/m ² terre arable org. éq.]	1,09
Changement climatique	[kg CO ₂ éq./kg CO ₂ éq.]	1,00
Extraction de minerais	[MJ/MJ surplus]	1,00
Énergie non renouvelable	[MJ/MJ primaire]	1,00

d. Normalisation et pondération

Les éléments facultatifs de l'évaluation des impacts incluent une normalisation, un regroupement et une pondération.

La **normalisation** a pour but de rapporter les résultats de la caractérisation des impacts à des valeurs de normalisation servant de références correspondant à un effet total (régional, national ou mondial). Lors de la caractérisation, les résultats sont exprimés en unité de référence pour chacune des catégories d'impact. Ainsi, il n'est pas possible de comparer les catégories entre elles. La normalisation permet alors de comparer entre eux les résultats des différentes catégories en rapportant ces résultats sur une unité commune les pers.an. Le score normalisé s'exprime ainsi :

$$N_d = SD_d / VN_d$$

Avec N_d le score normalisé de la catégorie de dommage d, SD_d le score de dommage de la catégorie d et VN_d la valeur de normalisation, soit l'impact des émissions ou extractions totales actuelles.

Par exemple, pour normaliser les émissions annuelles d'une Toyota Yaris selon l'effet national canadien du score de la catégorie dommage changement climatique :

Émissions annuelles d'une Toyota Yaris (S_c) : 3 tCO₂

Émissions totales canadiennes⁵ (2014) : 537 Mt CO₂

Population totale canadienne (2014) : 35 544 000 pers.

Émissions par personne (2014) (VN_c) : 15,11 tCO₂/pers.

Impact normalisé pour la Yaris (N_c) : 0,19 pers.

La comparaison de résultats d'ACV de deux produits pour identifier celui qui est le moins dommageable pour l'environnement relève de la normalisation interne tandis que le calcul de la contribution relative de l'unité fonctionnelle d'un produit selon les tendances d'une région relève de la normalisation externe.

La méthode d'EICV IMPACT 2002+ utilise les facteurs de normalisation Européens mais des études ont été faites pour obtenir les facteurs de normalisation Canadiens (voir Tableau 6)

Tableau 6 Facteurs de normalisation européens et canadiens

Catégorie d'impact	Facteurs Européens	Facteurs Canadiens	Unité
Santé humaine	0,0070	0,113	DALY/pers·an
Qualité des écosystèmes	13 700	60 000	PDF*m2*an/pers·an
Changement climatique	9900	20 600	kg-eq CO ₂ /pers·an
Ressources	152 000	438 000	MJ primaires/pers·an

Données tirées de (Lautier *et al.*, 2010)

Le **regroupement** est un processus qualitatif qui implique le tri et/ou l'attribution de rangs. Une hiérarchie des résultats est établie selon les priorités subjectives données aux catégories d'impacts. Cette étape est généralement peu effectuée car elle fait intervenir un degré de subjectivité selon l'importance que porte chaque individu sur les catégories d'impacts et par conséquent peut s'avérer bien différente selon les personnes effectuant l'étude.

La **pondération** est un processus quantitatif qui permet de définir la valeur sociale accordée aux différents types d'impacts au travers de facteurs de pondération selon différentes visions, égalitaire (pondération égale pour chacune des catégories), anthropocentriste (pondération supérieure pour la santé humaine), éco-centriste (pondération supérieure pour la qualité des écosystèmes). Ces valeurs sociales sont déterminées au travers d'enquêtes auprès de la population, selon les stratégies gouvernementales (car témoignant d'une certaine hiérarchie de priorité) ou selon la volonté de payer (*willingness-to-pay*), c'est-à-dire la valeur monétaire estimée pour un impact donné. La pondération permet ainsi d'additionner les résultats normalisés, tous exprimés dans la même unité, pour arriver à un indicateur unique. Les normes ISO interdisent la publication des résultats d'une étude comparative basés sur une normalisation et une pondération. Cependant, si une pondération doit être effectuée, étant donné son caractère subjectif, il est demandé de comparer les résultats

⁵ Source : <http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/>

des tendances de contribution des catégories de dommages selon l'ensemble des combinaisons de facteurs de pondération possibles afin de s'assurer d'émettre une conclusion solide.

e. Méthodes d'EICV

À l'heure actuelle et à défaut de consensus, les normes ISO n'ont pas imposé un choix de méthode à privilégier pour effectuer l'EICV, ainsi de nombreuses méthodes existent. Lors de la conduite d'une ACV, il est alors primordial de confronter les résultats obtenus à une analyse de sensibilité sur la méthode sélectionnée en effectuant l'EICV selon deux ou trois méthodes différentes afin de vérifier la robustesse des résultats. En effet, si après avoir effectué l'analyse de sensibilité, les tendances sont inversées alors il est nécessaire de revenir à l'ICV pour affiner les hypothèses effectuées ou se montrer transparent dans les conclusions émises. Pour le choix de la méthode à utiliser, le critère de qualité est l'élément à privilégier en premier lieu devant l'adéquation géographique. De nombreuses méthodes complètes ont été développées en Europe. La méthode LUCAS est propre au Canada et LIME au Japon (Figure 27).

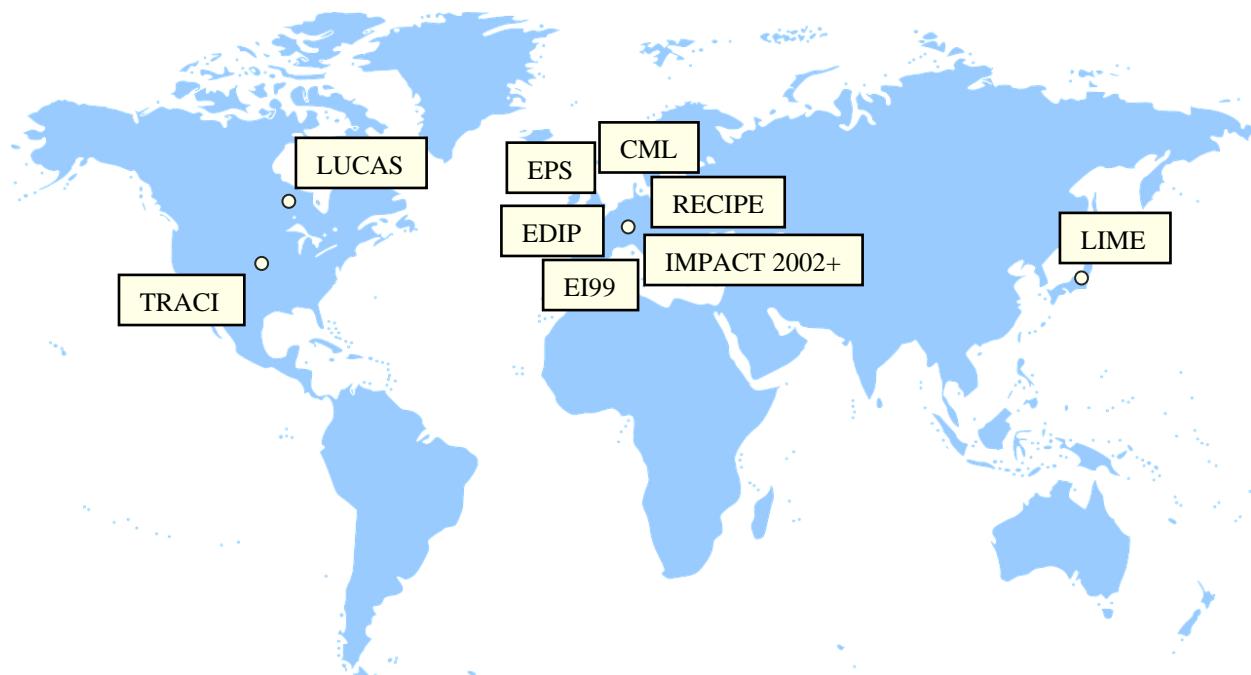


Figure 27 Provenance géographique de quelques méthodes d'EICV

Les méthodes se voient différentes par le type d'impacts qu'elles permettent d'évaluer mais également en raison :

- De la différentiation spatiale, facteurs de caractérisation propres à la zone caractérisée ;
- De la différentiation temporelle, caractérisation d'une forte émission ponctuelle et une faible répartie ;
- Du raffinement de la catégorie, nombre de substances considérées.

Certaines de ces méthodes permettent d'obtenir uniquement des résultats sur les catégories intermédiaires comme TRACI, Ecofacteurs 97 ou encore CML, uniquement sur la catégorie

dommage comme Ecoindicator 99 ou sur les deux types de catégories (problèmes et dommages) comme IMPACT 2002+, LIME ou ReCiPe par exemple. Il est à noter que ces méthodes n'ont pas forcément tout le même nombre de catégories et les mêmes catégories prises en compte. Par exemple, la méthode IMPACT 2002+ comporte 15 catégories d'impacts intermédiaires, affectées à quatre catégories de dommages (santé humaine, qualité des écosystèmes, changement climatique et ressources). Chacune de ces catégories permet de comparer les composantes l'affectant et exprime les résultats en kg-équivalent d'une substance de référence.

Tableau 7 Catégories intermédiaires et de dommages selon IMPACT 2002+

Catégories intermédiaires	Catégories de dommages	Unité de dommages
Toxicité humaine (cancérigène)	Santé Humaine	[DALY / kg chlorure de vinyle]
Toxicité humaine (non cancérigène)		[DALY / kg chlorure de vinyle]
Effets respiratoires inorganiques		[DALY / kg PM _{2.5}]
Radiations ionisantes		[DALY / Bq Carbone-14]
Destruction de la couche d'ozone		[DALY / kg CFC-11]
Effets respiratoires organiques		[DALY / kg éthylène]
Écotoxicité aquatique	Qualité des écosystèmes	[PDF.m ² .an / kg triéthylène glycol]
Écotoxicité terrestre		[PDF.m ² .an / kg triéthylène glycol]
Acidification / eutrophisation terrestre		[PDF.m ² .an / kg SO ₂ éq dans l'air]
Acidification aquatique		En développement
Eutrophisation aquatique		En développement
Occupation des sols		[PDF.m ² .an / m ² terre arable organique]
Changement climatique	Changement climatique	[kg CO ₂ / kg CO ₂]
Extraction de minéral	Ressources	[MJ / MJ primaire] ou [MJ / kg Fe éq]
Énergie non renouvelable		[MJ / MJ surplus] ou [MJ / kg pétrole brut]

Les unités employées pour les catégories de dommages de la méthode IMPACT 2002+ sont les DALY, les PDF.m².an, les kg CO_{2eq} et les MJ primaire. Les DALY, *Disability Adjusted Life Years*, sont utilisés pour mesurer les impacts sur la santé humaine et représentent les années équivalentes de vie perdues en raison de maladies, handicap ou morts précoces causés par les effets négatifs de substances émises par le système sous étude. Les PDF, *Potential Disappeared Fraction of species*, correspondent à la fraction d'espèces disparues sur un m² pour une année et mesurent la perte de qualité des écosystèmes.

La méthode américaine TRACI, développée par U.S. EPA, regroupe quant à elle 10 catégories intermédiaires (changements climatiques, destruction d'ozone stratosphérique, effets respiratoires, effets non cancérigènes, effets cancérigènes, acidification, eutrophisation, formation de photo-

oxydants, écotoxicité et extraction d'énergie) et permet la caractérisation d'impacts potentiels selon les conditions américaines. Elle ne possède pas de catégories dommages afin de limiter les incertitudes de modélisation.

La méthode ReCiPe est une méthode très complète car c'est une combinaison de CML et Ecoindicator 99 car elle utilise les 18 catégories intermédiaires de la première et les 3 catégories dommages (santé humaine, diversité des écosystèmes et ressources disponibles) de la deuxième.

6. Phase 4 de l'ACV : Interprétation

Cette dernière phase de l'ACV permet principalement de comparer les impacts environnementaux d'un produit par rapport à un autre et d'identifier les points chauds (les éléments les plus contributeurs selon les étapes du cycle de vie, les composantes du système ou les substances) où une amélioration peut être envisagée pour réduire l'impact. Une analyse de contribution doit être faite afin d'identifier l'étape du cycle de vie la plus dommageable et agir en conséquence sur celle-ci. Il est également intéressant de regarder les points où une amélioration environnementale peut être effectuée à faible coût permettant ainsi de concilier les aspects économiques et environnementaux.

Également, lors de cette phase, les limites de l'étude sont établies tandis que les recommandations et les conclusions qui en découlent permettront de diriger les acteurs lors de la prise de décision tout en respectant les objectifs définis dans la première phase.

Afin de valider les résultats, une série de contrôles peuvent être effectués que ce soit pour chaque phase de l'ACV ou pour vérifier des points tout au long de l'étude.

Le **contrôle de la qualité** des données passe notamment par la vérification de la bonne modélisation du système lors de la phase de définition des objectifs et du champ de l'étude. En effet, une transparence quant aux hypothèses et exclusions effectuées permettent d'identifier rapidement si une erreur a pu être commise. Aussi, de manière assez triviale, il est nécessaire de s'assurer qu'aucune erreur d'unités ou de conversion de données n'a été effectuée lors de l'inventaire.

Le **rapport émissions de CO₂/énergie non renouvelable consommée** permet de vérifier la cohérence des résultats. Il peut être calculé pour toutes les étapes du cycle de vie et comparés aux valeurs de la Figure 28 pour vérifier les ordres de grandeur. En général, les rapports doivent se trouver entre 25 et 100 pour affirmer que les données sont cohérentes (Jolliet et al., 2017).

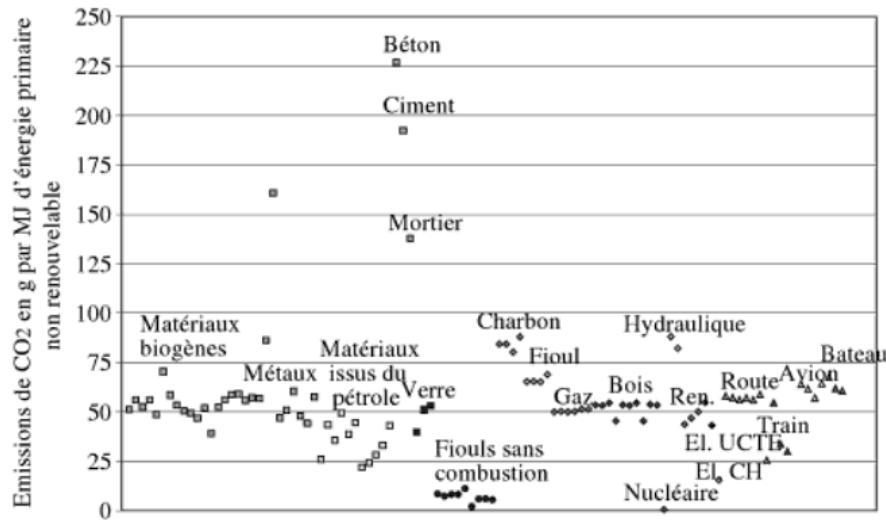
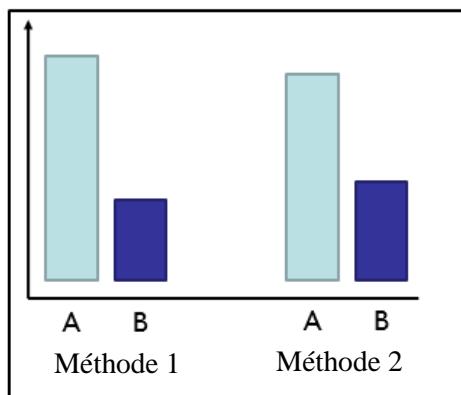


Figure 28 Rapport émissions CO_2 et consommation d'énergie non renouvelable

Une **comparaison avec des études** peut être effectuée afin de vérifier que les tendances et les conclusions tirées sont similaires. Les causes des éventuelles différences identifiées dans les résultats doivent ensuite être mentionnées.

Comme mentionné précédemment, une **analyse de sensibilité** peut aussi être une démarche intéressante afin de solidifier les résultats. Il s'agit alors d'effectuer la modélisation selon une autre méthode de caractérisation et de comparer les conclusions qui en découlent. Lors de cette analyse, une attention particulière sera portée sur les tendances de contribution des différentes phases du cycle de vie. L'analyse de sensibilité peut également porter sur les paramètres en les faisant varier d'une borne minimale à une borne maximale de valeurs possibles.

Résultats robustes:



Résultats non robustes:

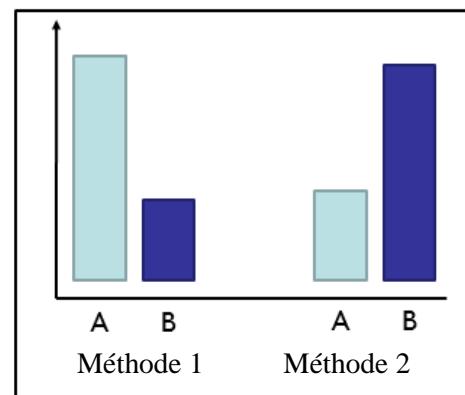


Figure 29 Résultats possibles lors d'une analyse de sensibilité

De plus, étant donné que l'ACV représente une étude des impacts potentiels, découle de nombreuses hypothèses et fait appel à des facteurs de caractérisations possédant des incertitudes multiples, il peut être intéressant de pratiquer une **analyse d'incertitudes** afin d'identifier l'incidence que cela peut avoir sur les résultats.

Étant donné que l'ACV est un processus itératif, les quatre phases peuvent être retravaillées de manière que les données de l'inventaire et les résultats de l'évaluation d'impact soient, scientifiquement et techniquement, les plus justes possibles. Une revue critique externe peut être nécessaire, en cas d'ACV comparative et/ou de volonté de divulgation au public, durant laquelle un panel d'experts vérifiera la conformité de l'analyse (méthodes et données utilisées) avec les lignes directrices des normes ISO.

II. LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

L'objectif de ce chapitre est de présenter les principales problématiques environnementales que notre société rencontre et qu'elle essaye de maîtriser pour un développement durable. Les processus physico-chimiques expliquant ces impacts seront mis en avant afin de comprendre le fonctionnement intrinsèque de ces phénomènes.

Les impacts de nos actions sur notre environnement sont très étudiés et l'information, une fois colligée, est très disponible. Les valeurs véhiculées par nos milieux sociaux (amis, famille, culture) sont souvent en opposition avec le bien-être de la planète. Il n'y a ici qu'à penser à la société de consommation où réussite est bien souvent synonyme de possessions matérielles. Cette situation rend le sujet très sensible puisque l'on peut facilement se sentir jugé, coupable ou démoralisé lorsque confrontés aux conséquences de notre mode de vie. Souvent, cette nouvelle information « scientifiquement prouvée » ébranle notre confiance en nos valeurs ou nos actions. Il est bien important de différencier et de ne pas confondre « informer » et « faire la morale ». En effet, il ne faut pas devenir une « victime » de la protection de l'environnement (sentiment d'impuissance, de culpabilité ou de persécution). Au contraire, une fois conscientisés, les habitudes de consommation et de vie changent et se transforment pour atteindre un meilleur équilibre. Il est ici intéressant de faire une analogie avec le fait de suivre un régime ou de décider d'arrêter de fumer où le changement ne se réalise pas drastiquement du jour au lendemain. Au contraire, pour être durable, la transformation doit se faire en douceur, par petites étapes successives mais aussi collectivement.

Les travaux et découvertes des ingénieurs ont depuis toujours fait avancer la société vers un meilleur bien être socio-économique. Cependant, inévitablement, ces actions ont également eu pour conséquence de nombreux impacts sur l'environnement dans lequel nous vivons. Aujourd'hui, au travers des lois et code de déontologie, il en est de la responsabilité de l'ingénieur de connaître, maîtriser et, le plus possible, éviter les impacts négatifs que son travail induit.

L'impact environnemental est l'ensemble des modifications positives ou négatives causées par une activité anthropique sur l'environnement. Celles-ci peuvent être fonctionnelles, qualitatives ou quantitatives et engendrées par une activité, un processus, un procédé, un produit ou un organisme sur tout son cycle de vie. L'impact environnemental se retrouve dans l'Étude des Impacts Environnementaux encadrée par la norme ISO 14001 mais aussi dans l'Analyse du Cycle de Vie où ils peuvent être mesurés selon les normes 14040 et 14044. (UVED, 2017)

1. Réchauffement climatique

Le **réchauffement climatique** est l'impact environnemental le plus couramment cité et celui dont la population mondiale est le plus informé.

Depuis la fin du XX^e siècle et ses premières observations il a été le fruit de nombreux débats scientifiques et politiques. Aujourd’hui, son existence est admise unanimement mais c'est sa cause qui reste au cœur de débats. En effet, nombreux sont ceux qui pensent que le réchauffement climatique observé ces derniers siècles est dû à l’ère géologique que nous traversons tandis que la majorité des scientifiques mettent en cause les activités anthropiques développées depuis le début de l’ère industrielle. Ces activités humaines causeraient l’augmentation de l’effet de serre résultant en une augmentation globale des températures (+0.85°C depuis 1880). Les débats sont également portés sur l’amplitude de cette augmentation globale dépendant des hypothèses d’évolution de la vie et de l’activité humaine. La Figure 30 montre les prévisions d’augmentation de température globale par rapport à cinq différents scénarios d’émissions appliqués sur plusieurs modèles (IPCC, 2022).

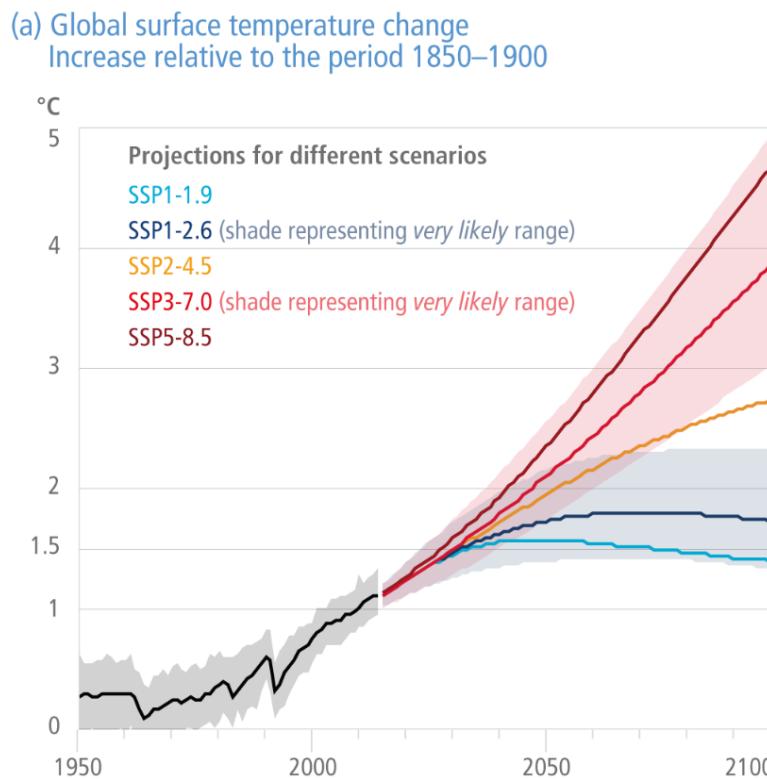


Figure 30 Projections d’augmentation de la température globale selon différents scénarios d’émissions

a. L’amplification de l’effet de serre

L’amplification de l’effet de serre est à l’origine de l’augmentation des températures moyennes globales sur la Terre. À ne pas confondre avec l’effet de serre qui est le phénomène naturel et indispensable du système terrestre. En effet, ce phénomène permet d’augmenter la température

moyenne de la surface de la Terre en raison de la présence naturelle dans l'atmosphère de gaz à effet de serre (GES) comme la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone (CO_2) et le méthane (CH_4) par exemple. Cependant, depuis deux siècles, il a été observé une augmentation des concentrations de ces gaz dans l'atmosphère alors qu'elles paraissaient stables auparavant (Figure 31)(OMM, 2016). Cette amplification provient de la réduction des puits de carbone, causée par les exploitations forestière et agricole, et l'intensification des activités anthropiques depuis la révolution industrielle causant des rejets majeurs de GES à cause de l'utilisation en abondance de combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel...), de l'enfouissement des déchets, de l'incinération des déchets, etc.

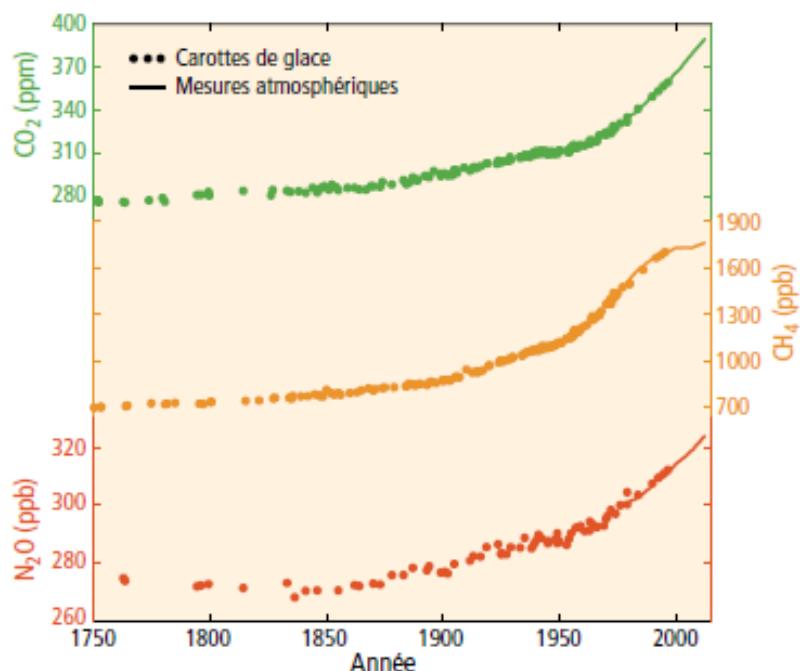


Figure 31 Évolution des concentrations moyennes des GES dioxyde de carbone, méthane et protoxyde d'azote

b. Comment fonctionne l'effet de serre ?

Ce terme d'effet de serre fait référence à la pratique courante en culture et jardinerie de construire des serres en verre permettant de laisser passer les rayons du soleil et donc sa chaleur et de la garder emprisonnée à l'intérieur afin de permettre aux plantes de bénéficier d'une température idéale pour leur développement. L'atmosphère provoquant le même effet, ce terme a donc été repris.

Pour comprendre le fonctionnement, il faut tout d'abord introduire l'albédo, qui est le pouvoir réfléchissant d'une surface soit le rapport de l'énergie lumineuse réfléchie sur l'énergie lumineuse incidente. Pour bien comprendre, un miroir parfait renvoie la totalité de l'énergie lumineuse, son albédo est donc de 1. La surface de la Terre a un albédo d'environ 0,30 de moyenne qui fait qu'une partie des rayons solaires arrivant sont renvoyés dans l'espace majoritairement par la neige et les zones glacées (albédo élevé situé entre 0,60 et 0,90), l'air et les nuages. Le reste des rayons sont

absorbés par le sol et l'atmosphère puis sont ensuite réémis vers l'espace sous formes d'infrarouges, cependant, les GES présents dans l'atmosphère empêchent leur évacuation totale en les absorbant. C'est donc en raison de la présence naturelle de GES dans l'atmosphère que ces rayons infrarouges sont absorbés et conduisent au réchauffement et à l'augmentation de la température de la surface terrestre. Grâce à ce phénomène d'effet de serre, la température moyenne de la Terre est de 15°C (il serait de -18°C sans celui-ci), permettant du fait même le développement de la vie sur Terre. (Voir Figure 32)

L'atmosphère se comporte alors comme un réservoir d'énergie. Si ce réservoir se remplit - donc si l'énergie emmagasinée par la terre augmente - c'est que le phénomène de l'effet de serre est plus efficace pour retenir (en fait ralentir la déperdition de) l'énergie. Il faut bien comprendre ceci : l'énergie de l'espace reçue par la terre et l'énergie de la terre émise vers l'espace sont égales en moyenne. Si ce n'était pas le cas, le changement de température de la planète serait toujours dans le même sens. Il y aurait alors deux cas de figure possibles : toujours plus froid ou toujours plus chaud. Si l'échange moyen d'énergie avec l'espace n'est pas nul, cela entraîne un stockage ou une perte d'énergie de la terre. Ce changement peut se traduire par un changement de température de l'atmosphère.



Figure 32 Le phénomène d'effet de serre⁶

c. Les gaz à effet de serre

Ainsi la teneur de l'atmosphère en GES à un effet direct sur l'effet de serre et donc le réchauffement de la surface terrestre. Les principaux gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère sont la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone (CO₂) (94% à eux deux), le méthane (CH₄), l'oxyde nitreux (ou protoxyde d'azote, de formule N₂O) et l'ozone (O₃). De plus, il faut noter la présence de gaz à effet de serre industriels incluant les halocarbones lourds (fluorocarbones chlorés incluant les CFC, les molécules de HCFC-22 comme le fréon et le perfluoro-méthane) et l'hexafluorure de soufre (SF₆). Cependant, comme mentionné précédemment, les concentrations en GES dans l'atmosphère ont augmenté en raison des activités anthropiques, la Figure 33 montre les contributions à l'effet de serre additionnel des différents GES émis par l'Homme (IPCC, 2013).

⁶ Sources : www.ale-lyon.org et www.syngenta.fr

Il est possible de constater que le dioxyde de carbone ainsi que le méthane sont les plus grands contributeurs de cette augmentation.

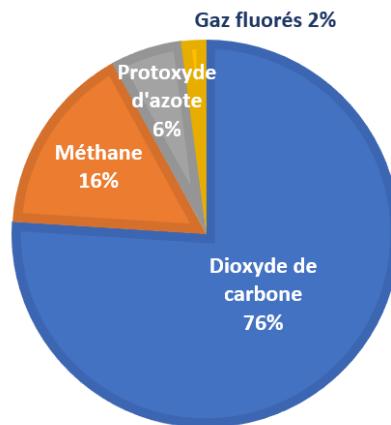


Figure 33 Part des émissions anthropiques de GES par gaz⁷

Les émissions anthropiques proviennent de différentes origines :

- Pour le dioxyde de carbone (CO_2), l'utilisation des combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) représente la majorité des émissions mais aussi les procédés industriels, comme par exemple la production du ciment, l'utilisation des territoires spécifiquement la déforestation, le défrichement pour l'agriculture, le traitement des déchets, etc.
- Pour le méthane (CH_4), ce sont les activités agricoles (dû au bétail), le traitement de déchets (décharges), l'utilisation d'énergie et la combustion de la biomasse (incomplète relâchant des hydrocarbures dont le CH_4) qui représentent les sources majeures.
- Pour le protoxyde d'azote (N_2O), les émissions proviennent majoritairement de l'utilisation de fertilisants dans les activités agricoles.
- Pour les gaz fluorés (CFC, HCFC, HFC, PFC et SF_6), ce sont certains procédés industriels (la fabrication du plastique ou les semi-conducteurs par exemple), les systèmes de réfrigération et une variété de produits quotidiens (déodorants par exemple).
- Pour la vapeur d'eau, les émissions anthropiques sont négligeables à l'échelle de notre système planétaire étant donné que la planète est couverte aux deux tiers d'eau et que son temps de résidence est très faible, la teneur dans l'atmosphère ne varie pas assez pour avoir un impact.

Les contributions aux changements climatiques dépendent de plusieurs facteurs notamment de la concentration dans l'atmosphère du GES en question, de sa durée de vie dans l'atmosphère, autrement dit son temps de résidence, mais aussi de son pouvoir radiatif. En effet, les différents temps de résidence des GES ont une incidence sur leur pouvoir radiatif qui correspond au pouvoir de réchauffement global du gaz (GWP en anglais pour Global Warming Potential). Il est estimé comme le pouvoir d'un kilogramme de ce gaz par rapport à un kilogramme de CO_2 et dépend à la

⁷ Adapté de <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>

fois des propriétés radiatives du gaz, donc son aptitude à l'absorption des infrarouges, et de son élimination progressive de l'atmosphère. Le GWP peut être exprimé selon plusieurs horizons temporels, dans le Tableau 8, les valeurs des temps de résidence des principaux gaz sont données, ainsi que leur GWP sur un horizon de 100 ans. Le méthane a une durée de vie plus courte que le CO₂ donc son GWP₁₀₀ est plus petit que le GWP₂₀ mais celui-ci peut être plus important sur 100 ans que sur 20 ans, comme pour le CFC par exemple, quand la durée de vie de la molécule est plus longue que celle du CO₂. Prenons par exemple le méthane qui a un GWP estimé de 28 kg CO_{2eq}, cela signifie que l'émission d'1 kg de CH₄ dans l'atmosphère a le même effet radiatif que l'émission de 28 kg de CO₂ sur un horizon de 100 ans.

Tableau 8 Durée de vie dans l'atmosphère et GWP de certains GES

GES	Temps de résidence (années)	GWP ₁₀₀ (kg CO _{2eq})
Dioxyde de carbone	Variable	1
Méthane	12.4	28
Protoxyde d'azote	121	265
Gaz fluorés	De quelques jours à 50 000 ans	De 1 à 23 500

Source : chapitre 8 WG1AR5 Tableau 8.A.1 (p.731)

Ces facteurs sont ceux utilisés pour mesurer les impacts sur le réchauffement climatique de différents GES émis par une activité ou un produit lors de son cycle de vie.

Comme mentionnée précédemment, depuis l'ère industrielle, les concentrations de GES ont augmenté dans l'atmosphère de manière linéaire. Par rapport aux concentrations estimées de 1750, les augmentations se situent entre +21% (pour le NO₂) et +156% (pour le CH₄). Entre 2014 et 2015, le taux d'accroissement de la concentration en CO₂ est plus important que pour les années précédentes et que le taux moyen des dernières décennies. Celui du méthane augmente également depuis 2007 à cause des émissions des zones humides dans les régions tropicales et des émissions anthropiques dans l'hémisphère nord. Enfin, le protoxyde d'azote a augmenté aussi en raison de l'utilisation accrue d'engrais pour l'agriculture. (CITEPA, 2017)

d. Conséquences pour l'environnement

L'amplification de l'effet de serre constitue donc le problème majeur du réchauffement climatique menant à une augmentation des températures globales. Cette augmentation provoque la dilatation thermique des océans ainsi que la fonte des glaciers terrestres et des inlandsis (et non les icebergs) menant à une élévation du niveau de la mer et, par la même occasion, la disparition des terres les plus vulnérables comme les îles Maldives, la mise en danger de nombreuses espèces et la disparition de phytoplancton. Ce dernier est un organisme végétal indispensable au système terrestre car il est responsable de la production de 50% de l'oxygène terrestre et de l'absorption de près de la moitié du dioxyde de carbone par le mécanisme de photosynthèse (Phenomer, 2013). De nombreuses autres conséquences comme l'augmentation des précipitations, le dérèglement des courants marins, l'acidification des océans... pourraient s'avérer désastreuses pour le futur. Les scientifiques prévoient une augmentation allant de 1°C à 4°C en 100 ans selon différents scénarios

de mitigation et différents modèles de calculs (voir Figure 30). Cependant, même en cas d'arrêt total des rejets de carbone, l'augmentation de la température moyenne de la planète serait toujours observée en raison du temps de résidence des GES dans l'atmosphère.

e. Conséquences physiques

La Terre reçoit le rayonnement solaire à hauteur de 340 W/m^2 , en partie sous forme visible, qui est absorbé à 47% par le sol, 23% par l'atmosphère et le reste (30%) réfléchie par les nuages, la neige, les déserts et les glaciers majoritairement. Ensuite la surface terrestre émet cette énergie sous forme d'infrarouges qui sont absorbés par les GES (Figure 34) (IPCC, 2013).

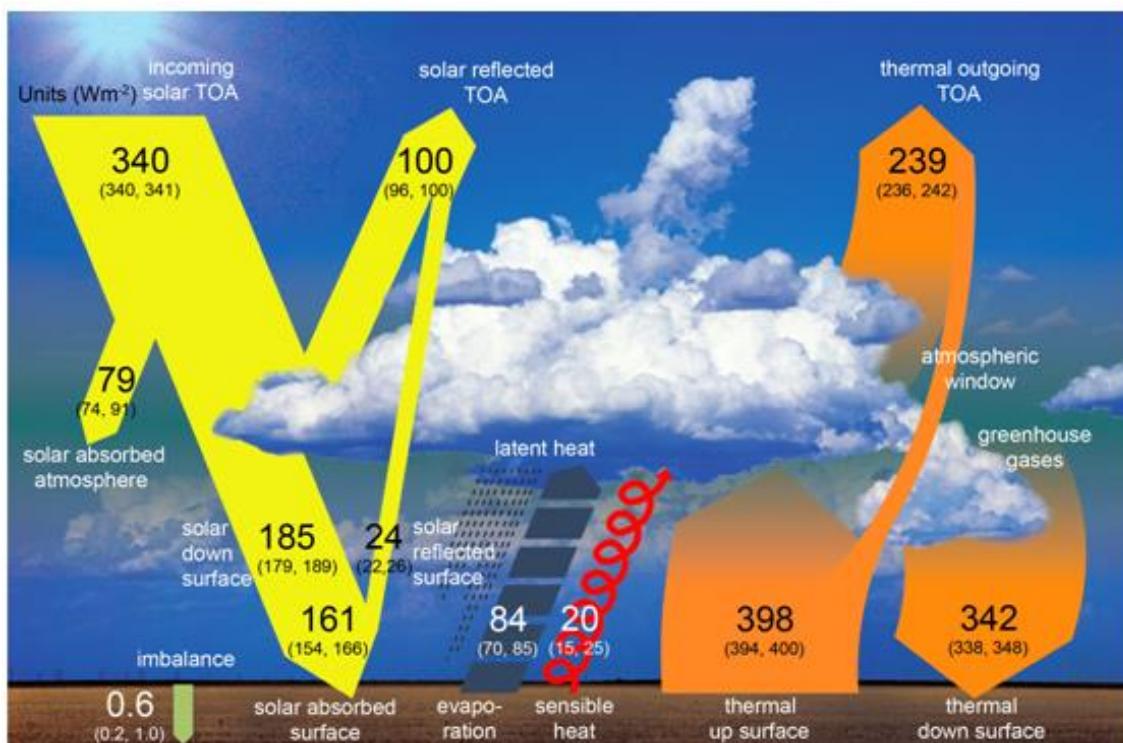


Figure 34 Bilan radiatif de la Terre

Cependant, la présence des GES d'origine anthropiques dans l'atmosphère provoque une augmentation du forçage radiatif, capacité à absorber le rayonnement, estimé à 1% (+2,3 W/m²). Cette valeur peut paraître faible mais on parle d'ici d'un système solaire qui envoie des quantités astronomiques de rayons solaires donc même une infime augmentation peut provoquer des changements majeurs. Les différents modèles permettant d'estimer le degré d'intensité du réchauffement climatique futur servent également à estimer les changements des autres paramètres terrestres physiques, comme :

- **L'élévation du niveau de la mer.** Selon le cinquième rapport du GIEC, entre 1901 et 2010, le niveau moyen des mers à l'échelle globale s'est élevé de 0,19 m [de 0,17 m à 0,21 m] à un rythme supérieur par rapport aux derniers millénaires. Cette élévation aurait deux causes : un phénomène de dilatation thermique du à son réchauffement, et la fonte des calottes glaciaires, qui provoquent une augmentation du volume d'eau dans les océans. Au

vu des raisons de cette élévation, les incertitudes sont relativement grandes avec pour le scénario le plus optimiste une augmentation entre 0,17 m et 0,55 m et le moins optimiste une augmentation entre 0,22 m et 0,82 m.

- **L'humidité absolue.** D'après les prévisions, l'humidité absolue moyenne de l'air devrait augmenter. Sachant que l'eau est le principal vecteur de la thermodynamique atmosphérique (l'évaporation absorbe de l'énergie et la condensation la restitue), la puissance des précipitations devrait aussi augmenter.
- **Les précipitations.** Elles devraient être plus importantes aux latitudes élevées de l'hémisphère nord et plus faibles dans les régions subtropicales et les latitudes moyennes. Ces précipitations seront plus nombreuses et également plus extrêmes menant à d'autres conséquences telles les inondations. Bien que globalement la tendance soit à l'augmentation des précipitations annuelles, ces changements seront différents selon les régions du globe.
- **L'acidification des océans.** Les océans agissent en puits de carbone en absorbant plus du quart des émissions anthropiques de CO₂. Cependant, cela engendre une augmentation de l'acidité des océans (diminution de 0,1 du pH depuis l'ère industrielle). L'augmentation pourrait être de 0,3 points d'ici 2100 réduisant la disponibilité du carbonate de calcium essentiel pour les organismes marins (les coraux, les mollusques, les coquillages et le plancton) qui seraient alors menacer (Figure 35). L'augmentation actuelle de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère provoquerait un ralentissement de 50% de la croissance des coraux d'ici 2050.



Figure 35 Mort des coraux à cause de l'acidité des eaux⁸

⁸ Sources : <http://www.pg-du.com/> et <http://www.reefnation.com/>

- **La circulation thermohaline.** Ce terme désigne la circulation permanente à grande échelle de l'eau des océans due à des écarts de température et de salinité des eaux. Les eaux froides (-2°C) et salées plongent dans le fond des océans dans les hautes latitudes de l'hémisphère nord (mer du Labrador, au large du Groenland et au large de la Norvège) tandis que la température de surface des océans sous les tropiques avoisine les 25-30°C. Ces eaux denses naissent donc dans l'océan Atlantique nord puis s'écoulent vers le sud pour ensuite se diriger vers l'est à cause du courant circumpolaire Antarctique puis étant réchauffer elles remontent pour se répandre dans les océans Atlantique sud, Pacifique et Indien. Ensuite, elles retournent dans l'océan Atlantique nord par les courants de surface chauds liés à la circulation atmosphérique (Figure 36). Les eaux mettent 1 500 ans à parcourir la « boucle » autour du globe. Ce phénomène est, en partie, responsable du renouvellement des eaux profondes et de la douceur du climat européen. Cette circulation existe en raison de la différence de densité des eaux et est donc mis en danger par la fonte des glaces qui apporte de l'eau douce en grandes quantités, diminuant la salinité de l'eau et donc sa densité. Le ralentissement de ce phénomène est envisagé comme une conséquence du changement climatique mais son arrêt total reste peu probable d'après l'IPCC, tout en gardant des réserves pour le long terme. Dans tous les cas, le ralentissement ou l'arrêt, provoquerait, entre autres, un affaiblissement du *Gulf Stream* (courant chaud adoucissant l'Europe) entraînant donc un refroidissement de l'Europe de l'Ouest, du Nord et de la côte Est des États-Unis, une augmentation des inondations et tempêtes majeures, un El Niño renforcé et plus fréquent, etc. (Éric Denoux, 2010; IPCC, 2013)

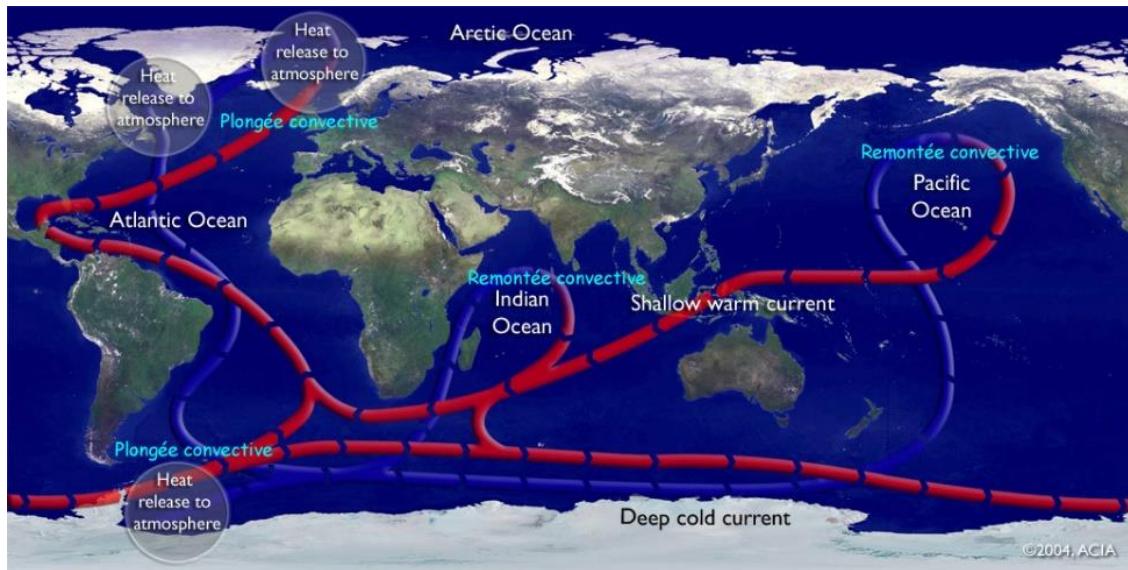


Figure 36 La « boucle » de la circulation thermohaline des eaux terrestres

- **Glaces et couverture neigeuse.** Les glaciers de montagne et les calottes glaciaires devraient continuer leur fonte et petit à petit totalement disparaître d'ici 50 à 100 ans. Le XXI^e siècle sera aussi marqué par le retrait des banquises et la réduction de la couverture neigeuse réduisant du même fait l'albédo de la Terre. L'Arctique, quant à lui, se réchauffe plus vite que le reste du globe et a vu sa banquise perdre près de 4% de son étendue par

décennie depuis 1979. Le pergélisol mondial, qui est ce sol gelé en permanence de plus de 100 000 ans, épais de 50 à 200 m et couvrant une superficie égale à deux fois celle du Canada, devrait également continuer de fondre provoquant des glissements de terrain affectant les infrastructures, les cours d'eau et les écosystèmes des zones humides. De plus, le pergélisol arctique contient du méthane en très grandes quantités et la fonte de ces sols engendre un relargage massif du gaz à l'atmosphère provoquant une augmentation de l'effet de serre étant donné le pouvoir radiatif du méthane (voir Tableau 8).

À très long terme, ces phénomènes devraient se multiplier et s'amplifier. Les climatologues insistent sur le fait que les GES ont une longue espérance de vie et que leurs effets peuvent survenir bien après leurs émissions. Malgré les efforts de stabilisation de leurs concentrations, les effets de réchauffement continueront en raison de l'inertie du système climatique. De même, l'inertie des glaces et des océans entraîneront une continuité de la fonte et de l'élévation du niveau de la mer.

Dans leur cinquième rapport d'évaluation, l'IPCC a publié une carte référençant les différents impacts des changements climatiques par région avec les différents degrés de confiance quant à l'occurrence de ces derniers (Figure 37).

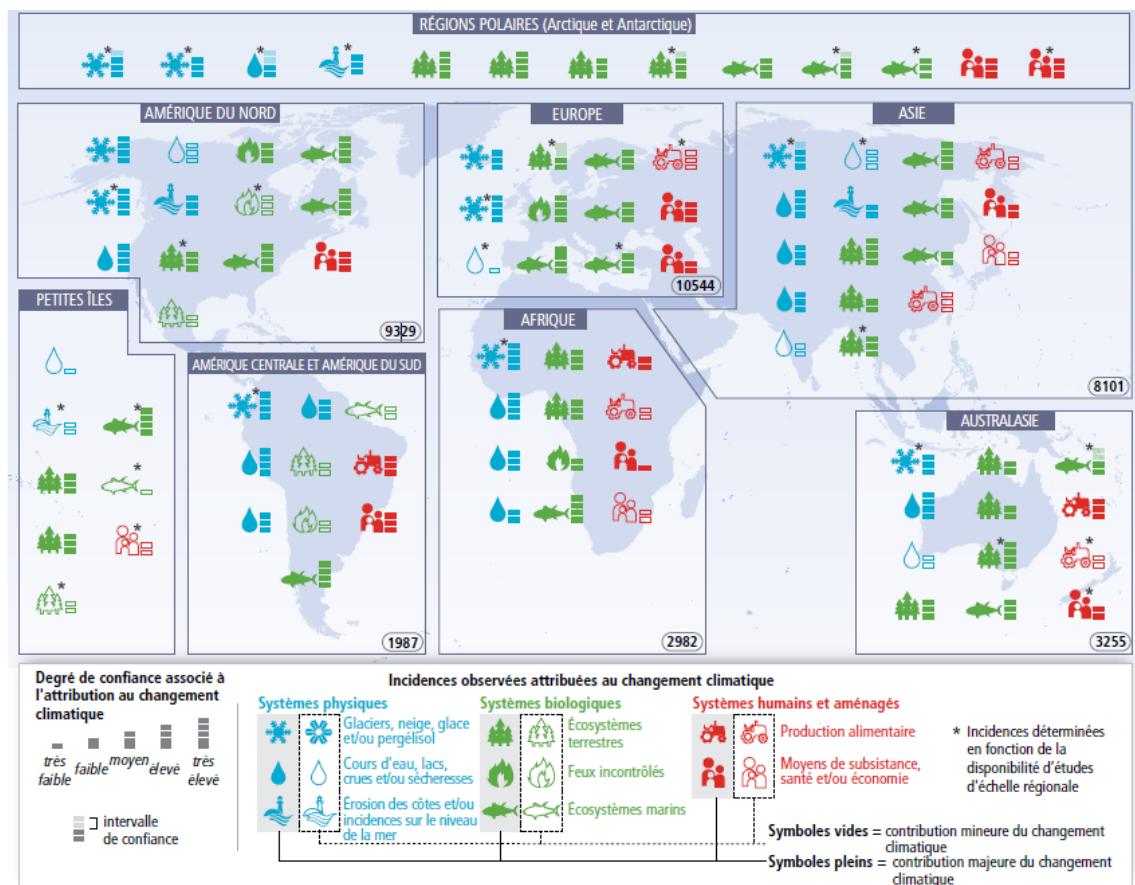


Figure 37 Carte de synthèse des impacts des changements climatiques par région⁹

⁹ Source : AR5 du GEIC, rapport de synthèse, Résumé à l'intention des décideurs Fig. SPM.4

f. Changements observés au Canada

Au Canada, différents changements conformes aux tendances et prévisions mondiales ont été observés tels la saison de croissance plus longue, l'augmentation des vagues de chaleur et la diminution des vagues de froid, la fonte du pergélisol, dislocation prématurée de la glace des rivières, l'augmentation des précipitations, éclosion hâtive des bourgeons d'arbres, etc. (Environnement Canada, 2015) Également, l'augmentation des températures moyennes est observée de manière universelle au pays mais d'une intensité différente avec +3°C pour le Nord canadien et +1°C pour la côte Est. Les phénomènes extrêmes se sont également multipliés au travers du pays entraînant des dommages humains et matériels (Figure 38).

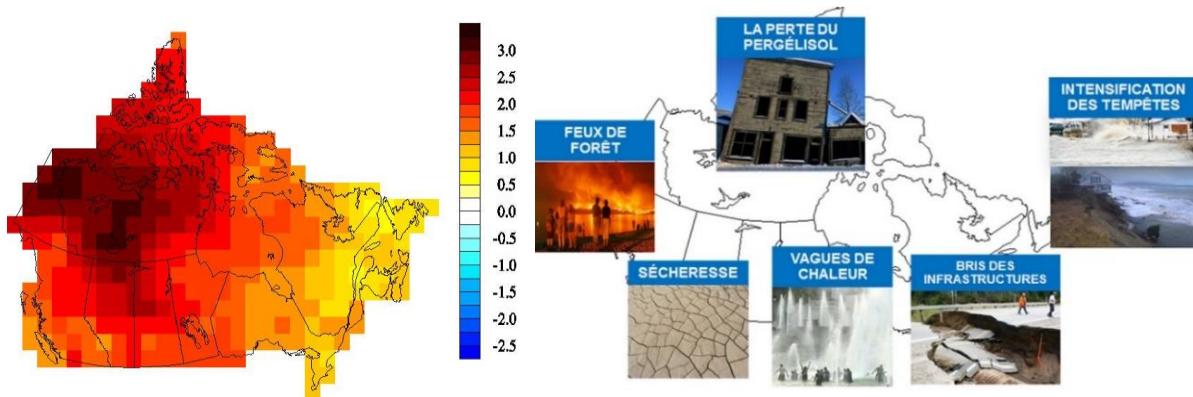


Figure 38 Augmentation des températures moyennes au Canada entre 1948 et 2012 (gauche) et effets des changements climatiques au Canada (à droite)

2. Diminution de la couche d'ozone

a. L'ozone stratosphérique

L'ozone (O_3) est une forme chimique particulière de l'oxygène, très instable et réactive. L'ozone stratosphérique¹⁰ (c'est celui-ci dont il est question lorsque l'on parle de « déplétion de la couche d'ozone ») est formé d'oxygène qui intercepte les radiations solaires ultraviolettes. La couche d'ozone d'une concentration constante de 10 ppm existe grâce à un équilibre de formation et de destruction d'ozone dans la stratosphère, entre 15 et 40 kms d'altitude. Il est à savoir que la formation de l'ozone se fait par photodissociation (sous l'effet du soleil) d'oxygène et est plus importante au-dessus des tropiques, puis gagne les pôles via la circulation des masses d'air. Sa destruction se fait également grâce au soleil mais aussi avec des éléments catalyseurs (brome, chlore, oxydes d'azote...) (Figure 39). C'est un processus rapide qui produirait chaque jour environ 400 millions de tonnes d'ozone pour une concentration d'ozone dans la stratosphère estimée à 3 milliards de tonnes soit un renouvellement journalier de 13%. (Berruyer, 2012)

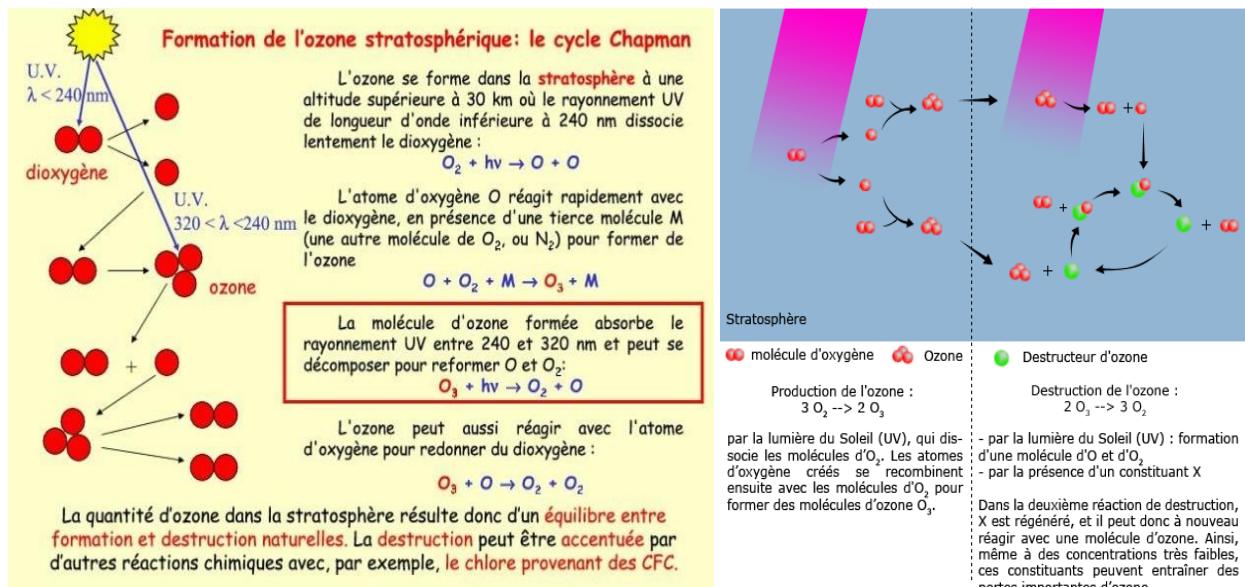


Figure 39 Cycle de formation et de destruction de l'ozone¹¹

La couche permet de bloquer 99 % des radiations solaires dont la longueur d'onde est inférieure à 330 nm. Les grandes longueurs d'onde de rayons UV, les UV-A, sont moins nocifs que les plus petites en raison d'un pouvoir de pénétration plus important. Au contraire, les UV-B et UV-C ont une plus grande énergie et détruisent les couches supérieures de la peau et de l'œil. Ces derniers sont arrêtés en quasi-totalité par la couche d'ozone et n'arrive donc pas sur Terre. L'absorption de ces rayons UV par l'ozone contribue au réchauffement de la stratosphère (Figure 40).

¹⁰Attention de ne pas confondre l'ozone stratosphérique nécessaire à notre protection avec l'ozone troposphérique responsable du smog (voir section 4) induit par la circulation automobile notamment.

¹¹ Source : <https://www.les-crises.fr/le-trou-de-la-couche-d-ozone/>

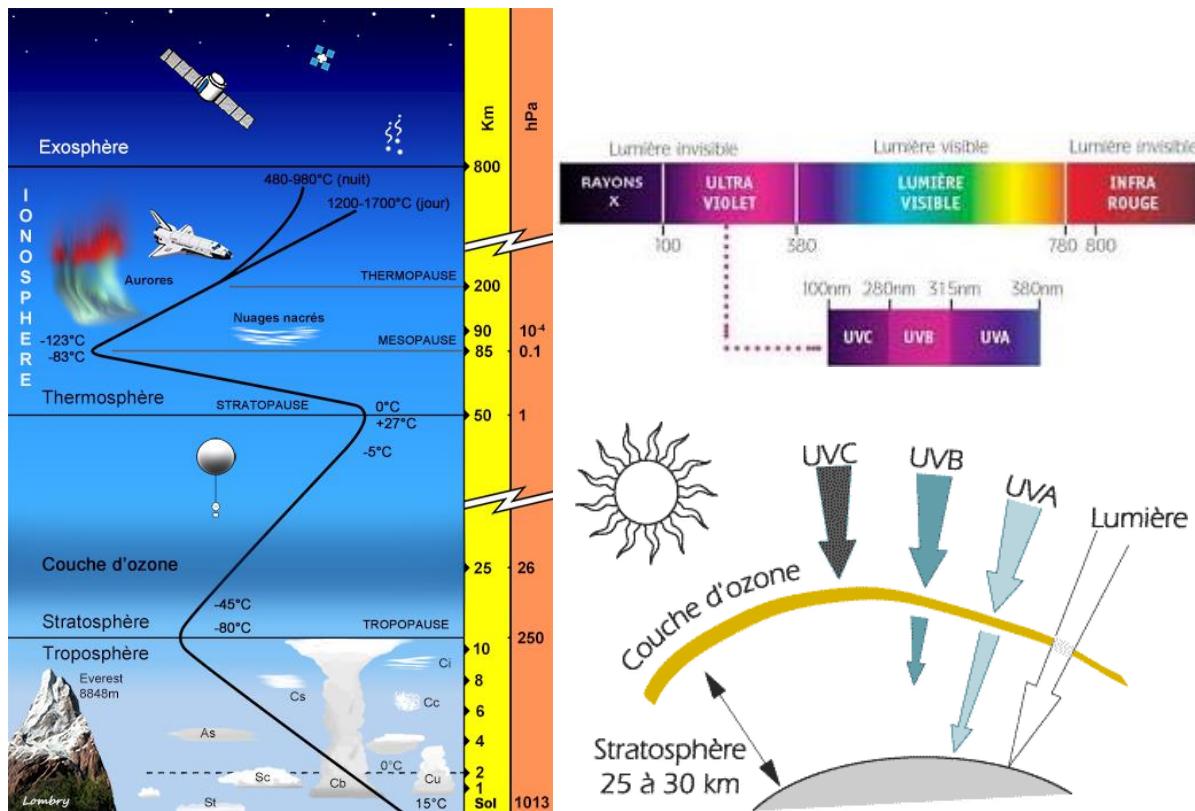


Figure 40 Description des différentes strates de l'atmosphère terrestre et de la capacité de la couche d'ozone à filtrer les rayons ultraviolets selon les longueurs d'ondes¹²

b. Le trou de la couche d'ozone

Le terme de "trou" dans la couche d'ozone est employé lorsque la valeur de la colonne intégrée en ozone est inférieure à 220 unités Dobson (la valeur normale étant 300 unités Dobson environ). Les unités Dobson expriment la totalité de l'ozone dans une colonne qui part du sol et traverse toute l'atmosphère. C'est au printemps 1986 qu'a été découvert le trou dans la couche d'ozone qui en réalité est plus une diminution de la concentration en ozone qu'une disparition complète. Cependant, cette diminution, suffisamment importante pour avoir des effets néfastes, se produit chaque année lors du printemps austral en raison de la combinaison des températures extrêmement froides dans la stratosphère et de la présence de deux gaz de source anthropique, le chlore et le brome, attaquant l'ozone. Les données pour l'Europe montrent des baisses de 5,4% de la concentration d'ozone par décennie depuis les années 80 en hiver et au printemps, avec une tendance à l'amélioration sur la période 1995-2000. Malgré la diminution du trou d'environ 4 millions de km² au début des années 2000, c'est pourtant bien en 2000 et en 2006 que les records de superficie pour le trou ont été observés (Figure 41). En 2015, après des années d'améliorations, le trou se reforme à nouveau atteignant la troisième plus grande superficie du trou observée avec 26,9 millions de km². Cependant, les améliorations observées avec la reformation prévue à long terme restent d'actualité car le record de 2015 peut être en partie expliqué par des températures

¹² Sources : <http://www.astrosurf.com/luxorion/Physique/atmosphere.jpg> et <http://lewebpedagogique.com/tpeuv/generalites/>

plus basses dans la stratosphère qu'à l'accoutumée ainsi que par l'activité volcanique de 2015 qui a vu l'éruption du volcan Calbuco au Chili relâcher une quantité importante d'aérosols soufrés dans l'atmosphère. Selon l'Organisation Météorologique Mondiale, ces observations proviennent du fait que « les températures observées dans la stratosphère antarctique varient d'une année à l'autre, si bien que certaines années, le trou d'ozone est relativement peu étendu, et d'autres années, il l'est davantage. D'une manière générale, cependant, cela n'inverse pas la reformation de la couche d'ozone à long terme prévue pour les prochaines décennies ». (OMM, 2015; Sacco, 2016)

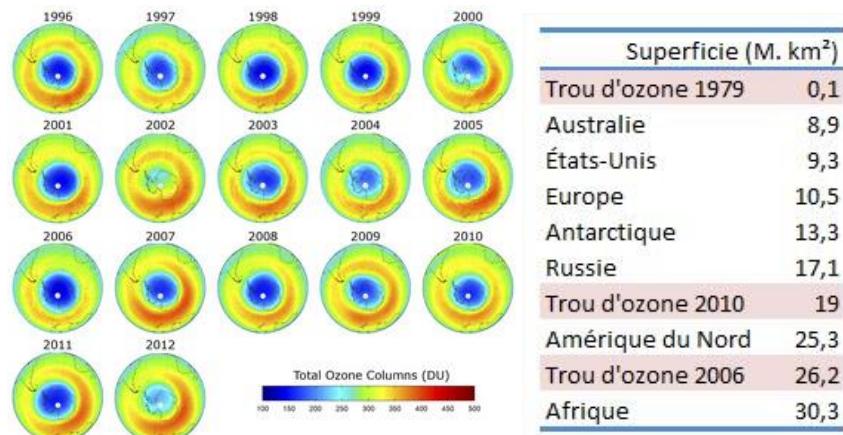


Figure 41 Trou dans la couche d'ozone en Antarctique pour les mois de septembre de 1996 à 2012 et sa superficie¹³

La diminution de la couche d'ozone provient d'un processus chimique de destruction des molécules d'ozone par la présence de Substances Appauvrissant la Couche d'Ozone (SACO) comme les Chlorofluorocarbures (CFC) et les Halons (composés de Brome). Le Protocole de Montréal en 1987 a permis d'éliminer progressivement ces SACO, notamment les CFC qui se retrouvaient dans les équipements de réfrigération et d'isolation. Après 1987, les quantités de consommations de ces gaz ont considérablement diminué permettant aujourd'hui d'espérer une résorption du trou d'ici 2050 (Figure 42).

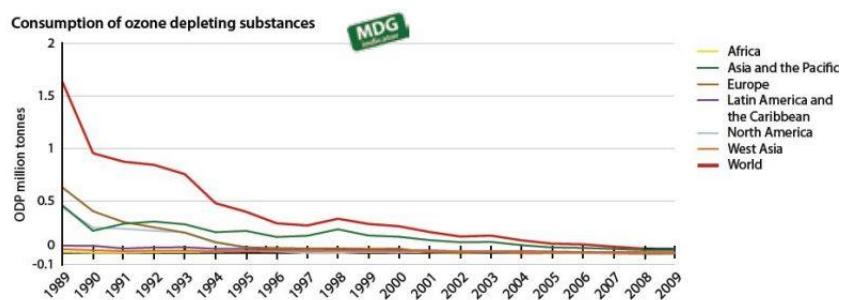


Figure 42 Évolution de la consommation des SACO dans le monde¹⁴

Les sources anthropiques de productions des substances destructrices de l'ozone sont notamment les systèmes d'extinction d'incendie (halons), les mousses plastiques, les produits de

¹³ Source : European Space Agency (<https://www.esa.int>) et <https://www.les-crises.fr/le-trou-de-la-couche-d-ozone/>

¹⁴ Source : <http://www.theozonehole.com/odcs.htm>

fumigation et pesticides (bromure de méthyle), les inhalateurs-doseurs (ID), les systèmes de réfrigération et climatisation et le dégraissage aux solvants. Les SACO relâchés par ces sources sont à ce jour le bromochlorométhane (BCM), les Chlorofluorocarbures (CFC), le tétrachlorure de carbone, les hydrobromofluorocarbures (HBFC), les hydrochlorofluorocarbures (HCFC), le bromure de méthyle, le méthyl chloroforme ainsi que les halons. Leurs durées de vie dans la stratosphère varient entre 20 et 120 ans expliquant leur puissance de destruction de l'ozone. (Welch Charles; Environnement Canada, 2013)

c. Les caractéristiques spéciales de la météorologie aux pôles

La Figure 43 ci-dessous représente schématiquement ce qui se passe au-dessus de l'Antarctique pendant l'hiver. Durant la nuit polaire austral, la lumière solaire ne peut éclairer le pôle Sud. Un vent violent circumpolaire se développe alors dans la moyenne et basse stratosphère. Ce vent est connu sous le nom de "tourbillon polaire" ou encore de "vortex polaire". Il a pour effet d'isoler l'air situé aux latitudes polaires du reste de l'atmosphère terrestre.

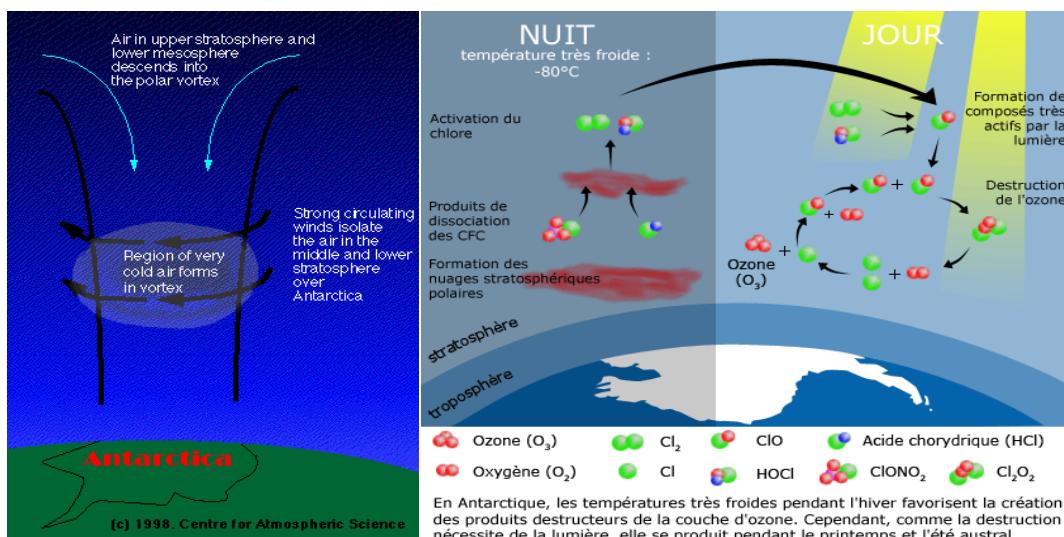


Figure 43 Schématisation des conditions météorologiques particulières au-dessus du pôle sud¹⁵

Tant que l'obscurité demeure, l'air à l'intérieur du tourbillon polaire peut y devenir très froid. Si froid que des nuages spéciaux peuvent alors se former si la température descend en dessous de - 80 °C. Ces nuages sont appelés nuages stratosphériques polaires (PSC pour *Polar Stratospheric Clouds* en anglais) mais ce ne sont pas des nuages communément vus dans le ciel, car ces derniers sont composés essentiellement de gouttes d'eau. Dans un premier temps, les PSC se forment d'abord avec des particules d'acide nitrique tri-hydraté. Mais si la température continue à décroître, de plus grosses particules de glace, renfermant de l'acide nitrique dissous en leur cœur, peuvent alors se former. Malgré tout, la composition exacte de ces particules est toujours l'objet

¹⁵ Sources : <https://www.les-crises.fr/le-trou-de-la-couche-d-ozone/> et <http://astromoko.info/Ozone.html>

d'intenses observations scientifiques. La présence de ces PSC est cruciale pour qu'une destruction d'ozone puisse avoir lieu.

Donc, les deux premières conditions pour la destruction de l'ozone sont :

1. Au pôle, un hiver conduisant à la formation du vortex polaire qui isole l'air à l'intérieur, du reste de l'atmosphère ;
2. De basses températures, suffisamment froides pour permettre la formation des nuages stratosphériques polaires (PSC). Tant que l'air du vortex polaire est isolé du reste de l'atmosphère persistent les basses températures.

d. Les processus chimiques menant à la destruction de l'ozone au-dessus des pôles

Il est maintenant reconnu que la présence des SACO, composés chlorés et bromés, dans l'atmosphère est à l'origine de la destruction observée de l'ozone lors des phénomènes de trous d'ozone en Antarctique et au-dessus du pôle Nord. En effet, le rayonnement UV du soleil sur les molécules citées ci-dessus, libère les atomes de chlore et de brome qui par la suite dissocient un atome d'oxygène à l'ozone. Une fois libéré un atome de chlore pourrait détruire 50 000 molécules d'ozone ! Il est estimé que la totalité des espèces chlorées et environ la moitié des espèces bromées proviennent des activités humaines (Figure 44).

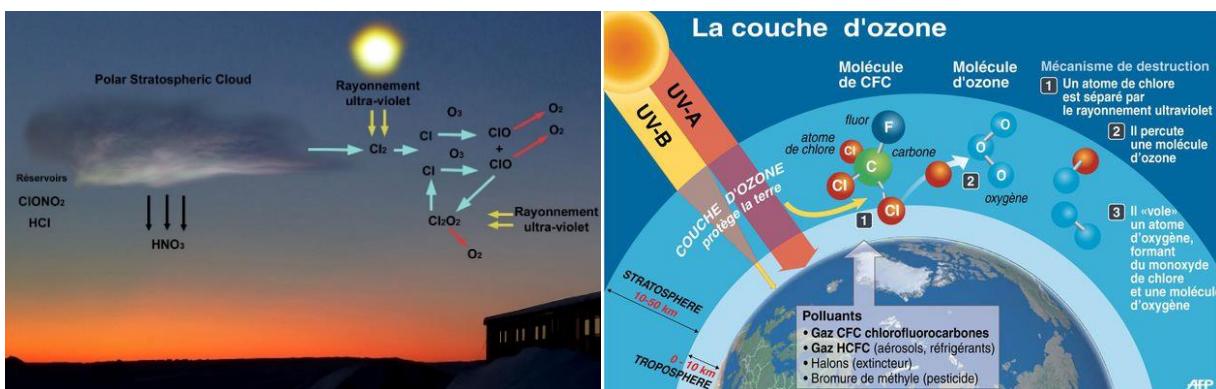


Figure 44 Schémas synthétiques décrivant la chimie de la destruction de l'ozone en présence des PSC¹⁶

Sans les PSC, les molécules de CFC, cassées par le rayonnement solaire vers 20-30 km, libèrent du chlore qui est principalement stocké dans des molécules dites "réservoirs", car inactive sur l'ozone. C'est cependant en présence de PSC, que ces molécules réservoirs, par chimie en phase hétérogène (réactions gaz/liquide ou gaz/solide) à la surface des particules formant les PSC, sont à leur tour cassées et laissent libre le chlore sous ses formes dites "actives", car destructrices d'ozone. Les principaux vecteurs pour les espèces inorganiques à longue durée de vie, appelées espèces réservoirs de chlore, sont l'acide chlorhydrique (HCl) et le nitrate de chlore (ClONO₂). Ils se forment à partir des produits de décomposition des CFC. Le pentoxyde d'azote (N₂O₅) est une espèce réservoir des oxydes d'azote, mais joue également un rôle important dans la chimie

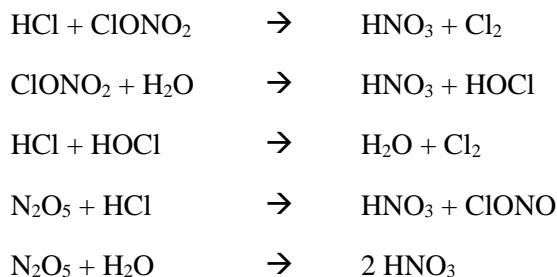
¹⁶ Source : <http://christelle-en-antarctique.ta64.tf/?p=689>

stratosphérique. L'acide nitrique (HNO_3) est important, car il maintient des niveaux élevés de composés chlorés actifs, comme nous le verrons par la suite.

e. La production des radicaux chlorés

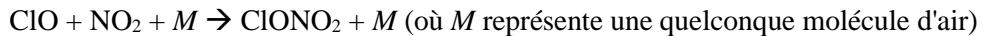
Un des points les plus importants à propos de la chimie du trou d'ozone et dont il faut être bien conscient, est que les réactions chimiques clés sont inhabituelles. Elles ne peuvent pas se dérouler dans l'atmosphère en dehors de la présence des conditions mentionnées au point précédent.

Le point central de cette chimie inhabituelle est le fait que les réservoirs HCl et ClONO_2 (ainsi que leurs pendants parmi les espèces bromées) sont convertis sous des formes chlorées beaucoup plus réactives à la surface des nuages stratosphériques polaires. Les réactions les plus importantes pour la destruction de l'ozone sont :



Il est important de noter que ces réactions ne peuvent avoir lieu qu'à la surface des nuages stratosphériques polaires, et qu'elles y sont très rapides. C'est la raison pour laquelle la découverte du trou d'ozone causa une telle surprise : les processus de chimie hétérogène (ceux qui se déroulent sur des surfaces solides) étaient négligés en chimie atmosphérique (du moins pour la stratosphère) avant la découverte du trou d'ozone. Ces réactions de chimie hétérogène qui permettent aux espèces réservoirs du chlore et du brome de se convertir très rapidement sous des formes beaucoup plus réactives, sont donc un nouvel ingrédient de la destruction de l'ozone.

L'acide nitrique (HNO_3) formé par les précédentes réactions demeure parmi les particules des PSC, donc les concentrations des oxydes d'azote en phase gazeuse s'en trouvent réduites. Cette réduction (dénoxification dans le jargon de la chimie atmosphérique) est très importante car elle ralentit la disparition de ClO qui autrement, aurait lieu au moyen de la réaction :



f. Conséquences des rayons UV sur la santé et l'environnement

La couche d'ozone est essentielle à la vie sur Terre car elle la protège des rayonnements ultraviolets nocifs émis par le Soleil. Il existe différents types de rayons UV regroupés en trois catégories : les rayons UV-C, les rayons UV-B et les rayons UV-A. L'impact des UV sur les organismes vivants dépend de la longueur d'onde de ces rayons. En effet, plus cette longueur d'onde est courte, plus le danger est grand. Bien que moins nocifs, les UV-A (98% des rayons arrivant sur Terre) sont responsables du vieillissement cutané, de l'apparition de rides et la dégradation du collagène pouvant engendrer des cancers de la peau. Les UV-B sont plus nocifs et sont responsables des

coups de soleil résultant d'une brûlure ou d'une inflammation et des cancers de la peau mais une partie d'entre elles sont filtrés par l'ozone de l'atmosphère. Les UV-C seraient théoriquement les rayons les plus nocifs en raison de leur courte longueur d'onde cependant ils sont retenus en intégralité par l'atmosphère. Or, cette couche protectrice s'est amincie dangereusement, particulièrement à une altitude comprise entre 14 et 20 km.

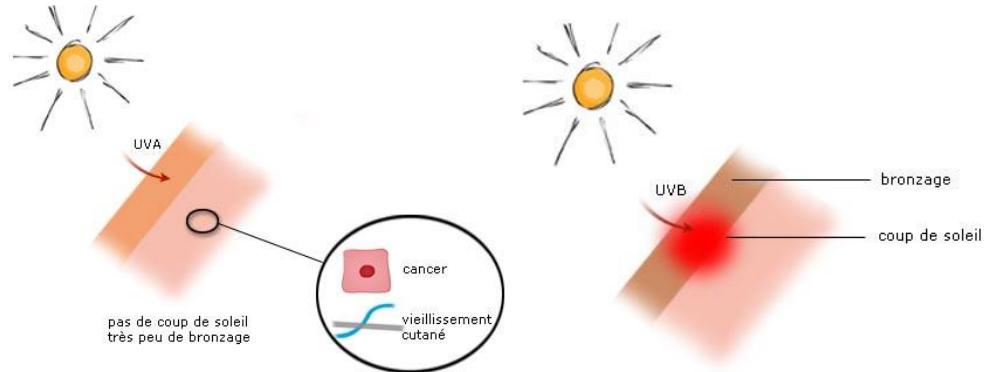


Figure 45 Effets des rayons UV-A et UV-B sur la peau¹⁷

La dégradation de la couche d'ozone observé lors de la deuxième partie du XXe siècle et au début du XXIe siècle implique une moindre filtration des rayons ultraviolets les plus nocifs et une élévation des risques pour la vie terrestre (Environnement Canada, 2013) :

- Les effets sur la peau entraînent donc une augmentation des cancers (carcinomes basocellulaires, carcinomes squameux et les plus graves, les mélanomes malins) et vieillissement de la peau. Les scientifiques estiment qu'une diminution de 10% de la couche d'ozone provoquerait une augmentation de 26% des cancers de la peau.
- Ceux sur les yeux entraînent des brûlures superficielles, des conjonctivites (endommagement des parties de l'œil tel le cristallin, la membrane et la cornée), des cataractes (opacification du cristallin menant à la cécité). Il est estimé à 2 millions nouveaux cas de cataracte pour une diminution de la couche d'ozone de l'ordre de 10%.
- Le système immunitaire se verrait également fragilisé avec une diminution de sa capacité à combattre les maladies et donc indirectement les effets des virus.
- La faune et la flore seraient aussi affectées avec une réduction de la photosynthèse provoquant la perte d'espèces végétales qui préviennent l'érosion du sol, réduisent les pertes hydriques et réduction de sa fonction de puits pour la séquestration du CO₂. Il serait observé une diminution des rendements et de la qualité des cultures, la disparition du plancton, premier maillon des chaînes alimentaires aquatiques, etc.

De plus, les UV-B :

- Accélèrent la génération du smog photochimique, stimulant ainsi la production de l'ozone troposphérique qui est nocif ;
- Diminuent "la durée de vie" de certains matériaux inorganiques comme les peintures et plastiques.

¹⁷ Source : <https://www.brulure.fr/coup-de-soleil/causes/>

3. Acidification

a. Généralités

L'acidification de l'atmosphère est directement liée aux émissions anthropiques de certains gaz comme le dioxyde soufre SO_2 (combustibles fossiles soufrés et procédés industriels), les oxydes d'azote NO_x (transports et industries), le dioxyde de carbone CO_2 (combustibles fossiles), l'ammoniac NH_3 (rejets organiques d'élevage) mais aussi le HCl et le HF . Ces gaz en présence d'humidité se transforment en acide (acide sulfurique H_2SO_4 et nitrique HNO_3 par exemple) et retombent sous forme de pluies acides sur Terre parfois à proximité des sources, parfois à plusieurs centaines, milliers de kilomètres de celles-ci. En condition sèche le dioxyde de soufre et les oxydes d'azote se transforment respectivement en sulfates (SO_4^{2-}) et nitrates (NO_3^{2-}).

Réactions chimiques du dioxyde de soufre et du dioxyde d'azote pour former les acides :



b. Milieux touchés et sources

Ces pluies acides engendrent une diminution du pH des rivières, lacs et des sols (menant à la disparition des espèces aquatiques et végétales ne pouvant survivre dans un milieu aussi acide), l'altération des sols, la dégradation des forêts et donc des équilibres écologiques locaux, la pollution de la nappe phréatique ou encore la dégradation des matériaux par corrosion. Une pluie est dite acide si son pH est inférieur à 5,6 et certaines pluies observées ont un pH compris entre 3 et 4. Ce phénomène a été mis en évidence par l'acidification des lacs scandinaves et canadiens observée par les modifications importantes de la faune piscicole.



Figure 46 Un lac avec une couleur bleue profonde est un signe d'acidification

Comme mentionné précédemment, ces gaz responsables de l'acidification de l'atmosphère ont une origine humaine mais sont également rejetés par des processus naturels. L'eau de pluie est naturellement acide en raison du dioxyde de carbone dissous et des émissions volcaniques de

soufre. Cependant, ce que nous appelons les pluies acides correspond à la conversion chimique des émissions anthropiques de soufre et d'azote provenant des centrales électriques alimentées avec un charbon de pauvre qualité comportant jusqu'à 5% de soufre, des usines, des fonderies de métaux non ferreux, des véhicules et des maisons où des combustibles fossiles sont brûlés. Ces gaz de rebut sont portés par le vent, parfois sur de longues distances et peuvent progressivement être convertis en acides sulfurique et nitrique. Le premier est majoritaire dans l'est américain en raison des centrales de charbon tandis que le deuxième prédomine dans l'ouest à cause des émissions automobiles.

Les sources naturelles de **dioxyde de soufre (SO₂)** sont les volcans, au travers leurs émanations lors des éruptions, les sources chaudes et les décompositions biologiques. Les quantités réellement dégagées sont difficiles à mesurer mais sont estimées à la moitié du total émis. Les sources humaines des émissions de ce gaz sont principalement la combustion de charbon contenant du soufre (50%), la combustion de pétrole sulfuré (25-30%) et pour compléter quelques procédés industriels comme l'extraction de métaux rares.

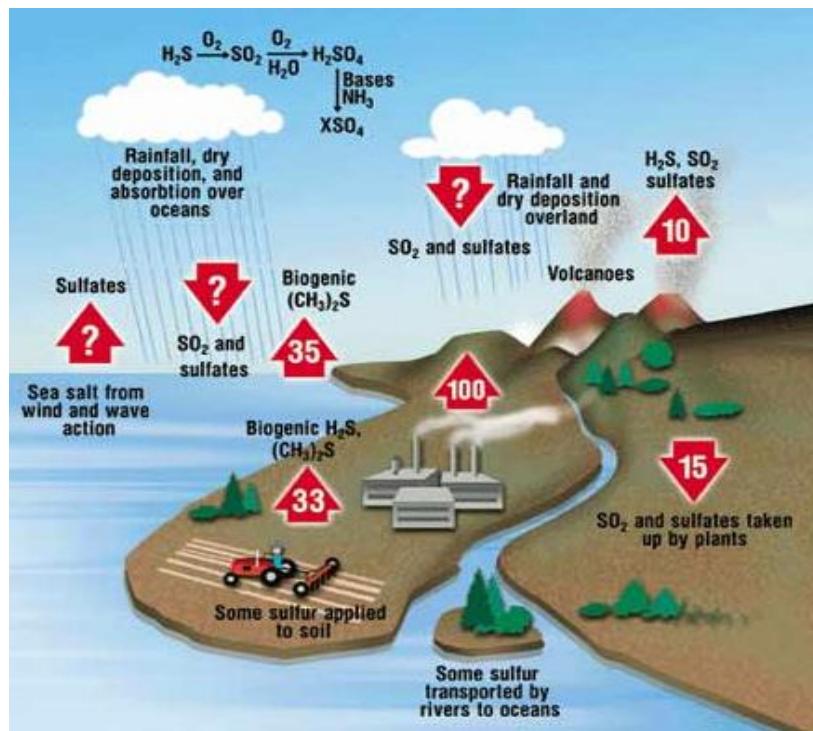


Figure 47 Cycle actuel du soufre avec les quantités (en Tg/an) estimées des émissions¹⁸

Les sources naturelles **d'oxydes d'azote (NO_x)** sont la foudre, les sources chaudes et la décomposition biologique tandis que les émissions humaines proviennent des réactions de combustion. Les estimations s'étendent de 20 millions à 90 millions de tonnes par an de NO_x dégagé par des sources naturelles, comparativement à environ 22 millions de tonnes issues de sources humaines dans le monde entier.

¹⁸ Source : <http://mtweb.mtsu.edu/nchong/NS-reactions-atm.htm>

L'ammoniac (NH_3) est un polluant provenant des activités agricoles (rejets organiques de l'élevage) et l'usage des automobiles équipées d'un catalyseur. Il est toxique dans un milieu aquatique notamment pour les poissons.

La répartition géographique des émissions des sources acides humaines n'est pas égale. En effet, les sources d'émissions d'azote et de soufre sont fortement concentrées dans l'hémisphère Nord, en particulier en Europe et en Amérique du Nord. En conséquence, les précipitations sont généralement plus acides dans ces pays, avec une acidité variant entre un pH de 4,1 et 5,1. Une précipitation naturelle sans éléments de pollution a un pH de 5,6 (Delmas *et al.*, 2010).

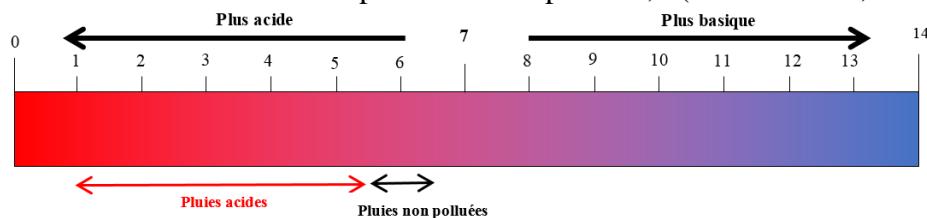


Figure 48 Phéneau de pH des pluies acides

c. Processus

Les pluies acides peuvent entrer directement dans le cours d'eau ou s'y infiltrer par captage (Figure 49). L'acidité de l'eau des lacs d'eau douce et des ruisseaux est principalement déterminée par les types de sol et de roche de la région. En effet, 90% de l'eau entrant dans ces cours d'eau passe à travers la terre, tandis que seulement 10% de l'eau des lacs et des ruisseaux viennent directement des précipitations. Si, au cours du processus de captage, les pluies acides rencontrent un sol très alcalin (milieu calcaire ou crayeux), elles seront neutralisées et l'eau entrant dans le lac sera moins acide. Cependant, si le sol est peu alcalin (base granitique ou dépôts de quartz), il n'y aura pas de neutralisation et l'eau de pluie entrera dans le lac, acide.

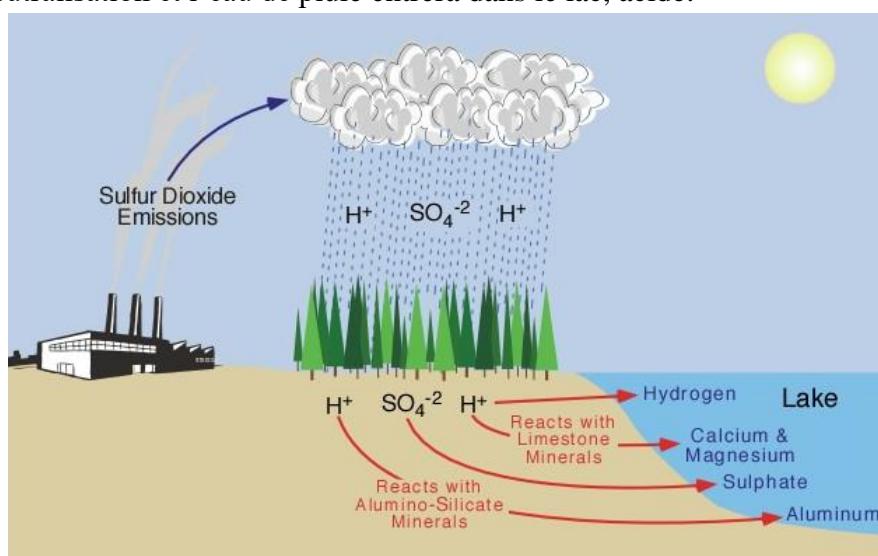


Figure 49 Les pluies acides entrent directement dans le cours d'eau ou s'infiltrent par captage¹⁹

¹⁹ Source : <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/8h.html>

En conséquence, les régions qui sont les plus susceptibles d'acidifier les eaux douces sont celles présentant une géologie acide avec du granit et du sol tourbe à la base. Les pluies acides qui s'infiltrent dans les eaux douces, déjà naturellement acides à cause de la géologie environnante, peuvent ajouter un stress supplémentaire sur des écosystèmes dépendants de tels environnements d'eau douce. Les lacs et les ruisseaux considérés comme acidifiés contiennent généralement une eau avec très peu de substances nutritives.

Ces zones affectées par l'acidification incluent la Scandinavie, l'Europe centrale, l'Écosse, le Canada et les États-Unis. L'acidification des eaux douces a été identifiée pour la première fois en Scandinavie pendant le début des années 70. Depuis lors, des milliers de lacs et de fleuves se sont acidifiés. Beaucoup de cette acidification d'eau douce a été le résultat de la pollution transfrontalière soufflant à travers la Mer du Nord depuis la Grande Bretagne. La Suède a plus de 85 000 lacs qui ont une superficie supérieure à un hectare. De ces derniers, 14 000 sont acidifiés par la pollution atmosphérique de l'homme, 4 000 étant sévèrement acidifiés. Les espèces sensibles aux acides sont absentes d'environ 40% des fleuves et des ruisseaux de la Suède.

Au Québec, les précipitations acides fortes sont répertoriées dans la vallée du Saint-Laurent, l'Outaouais et l'Abitibi. La rive sud du Saint-Laurent appartenant à un milieu calcaire, la chaîne des Appalaches, les précipitations acides sont plus neutralisées et donc les lacs sont moins affectés au contraire de la rive nord (Figure 50)(Dupont, 2004).

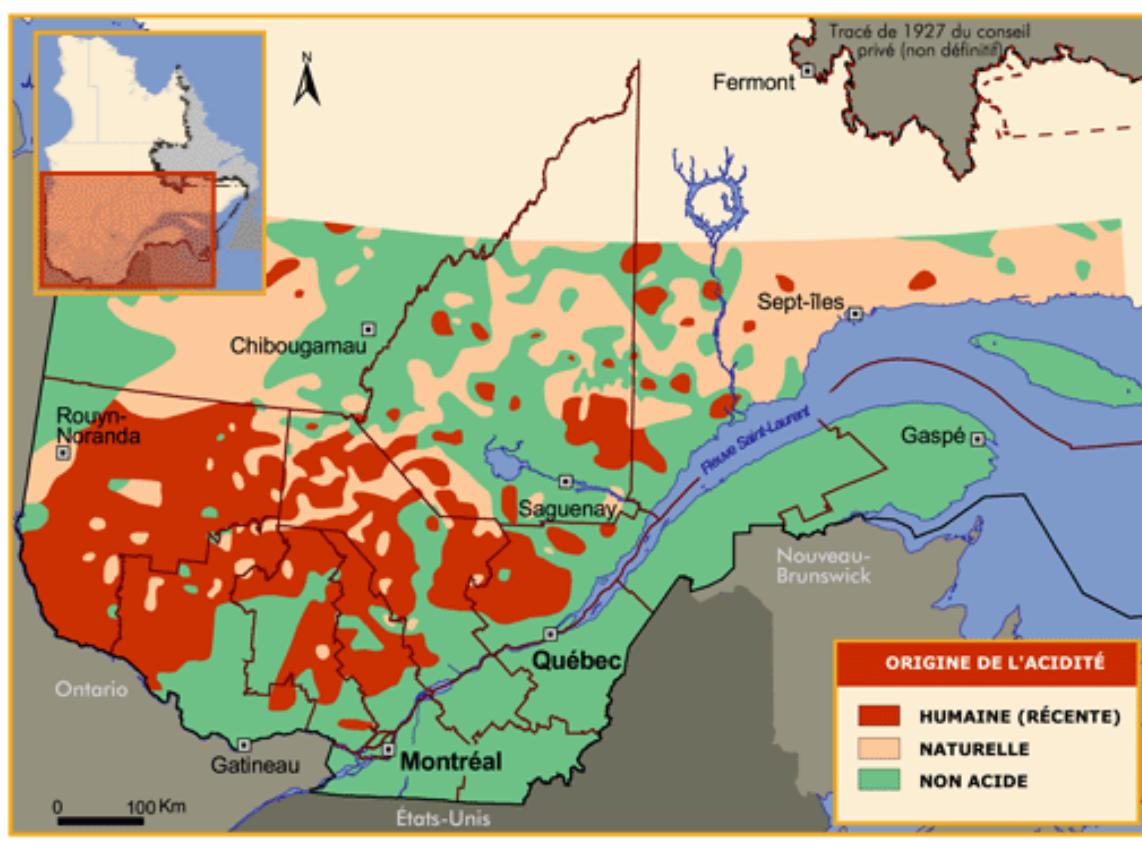


Figure 50 Origine de l'acidité des lacs au Québec

L'acidification d'un lac se produit avec le temps. D'abord la capacité naturelle d'absorption du lac neutralise l'acidité supplémentaire entrant dans le lac. Mais après un certain point, la capacité d'absorption du lac s'épuise et l'acidité de l'eau augmente rapidement. Avec le temps, l'eau du lac se stabilise à une certaine acidité, conservant un nombre restreint d'espèces de plantes et d'animaux, mais souvent très peu de poissons.

Chaque lac ou chaque écosystème possède un point de rupture au-delà duquel survient une dégradation ou une perte d'équilibre. Tant que les dépôts acides demeurent en dessous de ce seuil, le lac est en mesure de maintenir un pH adéquat et de supporter un écosystème en santé. Les problèmes commencent lorsque les dépôts acides excèdent ce point de rupture. Le pH du lac va diminuer et causer une série de dommages directs et indirects aux organismes aquatiques dont certains peuvent être irréversibles. Cette charge critique varie d'un lac à l'autre et d'une forêt à l'autre (voir Figure 51)(Dupont, 2004).

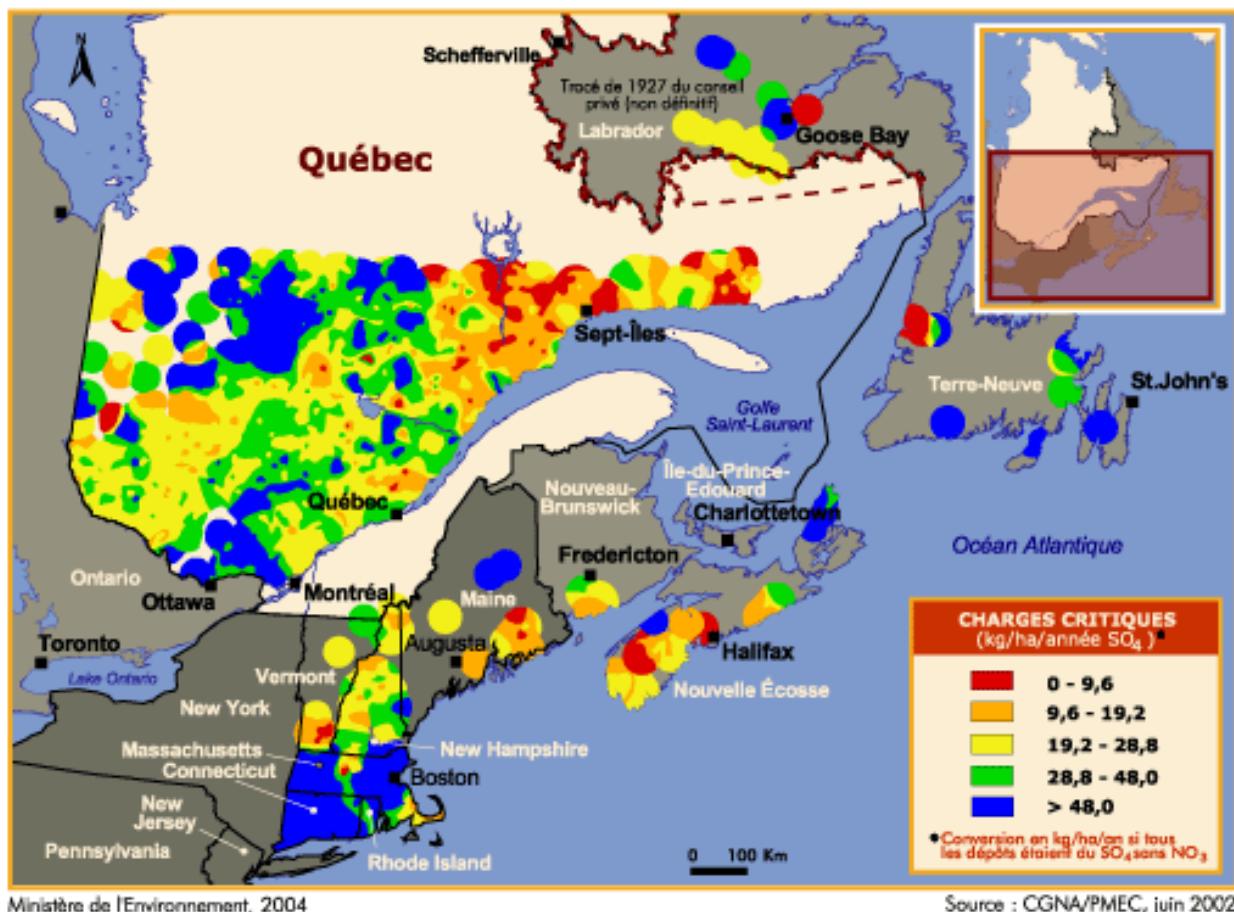


Figure 51 Répartition des charges critiques acides dans le nord-est de l'Amérique du Nord

En plus des pluies acides, un certain nombre d'autres facteurs peuvent influencer l'acidité des eaux douces, y compris l'introduction du bétail dans la zone de captage et l'utilisation d'engrais à base d'azote (voir Figure 52).

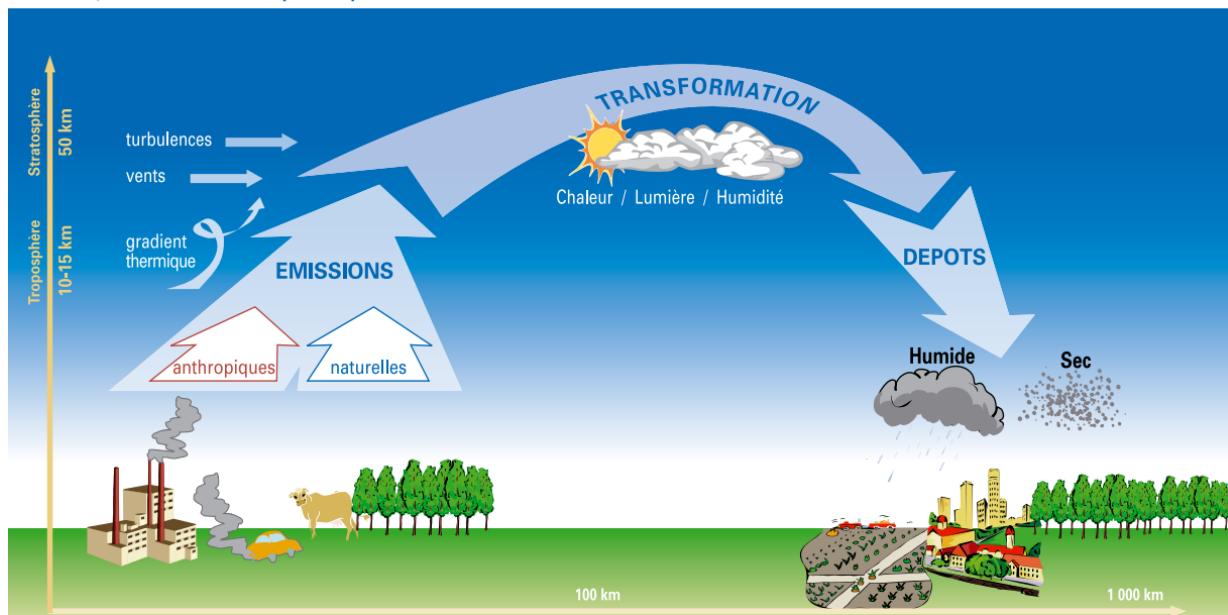


Figure 52 Processus de déposition de substances acidifiantes

d. Conséquences de l'acidification

Les pollutions acides provoquent la dégradation des matériaux d'édifices, de monuments, de façades, etc. (Figure 53). Les polluants riches en soufre se combinent avec le calcaire et le marbre particulièrement sensibles qui se transforment ensuite en gypse rendant la pierre friable qui finit emportée par l'eau de pluie. Les structures métalliques sont quant à elles affectées par la corrosion. De nombreux monuments célèbres comme la statue de la Liberté, le Parthénon d'Athènes, l'abbaye de Westminster, le Taj Mahal, etc. sont abîmés par ces pluies. C'est ainsi une importante partie du patrimoine culturel mondial qui est en danger occasionnant d'importants travaux de ravalement de façades et de restaurations pour les garder en état. (Delmas *et al.*, 2010)



Figure 53 Statues endommagées par l'acidité des pluies

Les effets sur les écosystèmes sont majeurs également. Tout d'abord les pluies acides provoquent le dépérissement des forêts. La survie des forêts à l'acidification dépend de sa capacité à neutraliser l'acidité. Cependant, les pluies acides dissolvent et emportent les éléments nutritifs du sol (tel le calcium, le potassium et le magnésium), font réagir les métaux toxiques (cadmium et mercure) avec les acides, tuant les microorganismes et menant à une perte de fertilité du sol. Les arbres grandissant sur ces sols sont plus sensibles aux maladies, aux insectes, à la sécheresse et aux champignons pouvant mener à leur mort. Les feuilles, aiguilles et les branches sont également endommagées réduisant leur résistance au froid et stoppant leur germination. La décoloration des feuilles (dû à la décomposition de la chlorophylle et donc à la perturbation de la photosynthèse) ainsi que la perte des épines témoignent des dégâts causés par les pluies acides (Figure 54)(Réseau Canopé, n.d.; Delmas *et al.*, 2010).



Figure 54 Forêt de conifères attaquées par l'acidité des pluies.

Les systèmes aquatiques sont également affectés en raison de l'acidification des eaux. Un lac aux eaux non polluées possède une grande diversité d'espèces vivantes à l'intérieur, comme les plantes, planctons, mollusques et poissons mais également les espèces périphériques, plantes, arbres et animaux sur les rives. Cependant, l'acidification entraîne plusieurs modifications :

- Régression du plancton
- Développement des algues filamentueuses et régression des plantes supérieures
- Régression puis disparition des écrevisses et mollusques
- Mortalité et baisse de la reproduction des poissons.

La baisse du pH provoque la mise en solution de métaux contenus naturellement dans le sol, comme l'aluminium, toxique à l'état dissous, pour presque la totalité des organismes vivants. La

vie sous-marine est grandement affectée par ces modifications et c'est toute la chaîne alimentaire qui subit les impacts de la disparition des premiers éléments comme les grands oiseaux se nourrissant de plus petits oiseaux qui se nourrissent de poissons... Cette disparition peut s'avérer parfois irréversible et entraîne alors la mort de la vie autour du lac.

Le début de l'acidification provoque un corps plus bleu et plus clair de l'eau à cause du dépôt des décompositions de matière organique sur les fonds. Tandis que la quantité totale de la matière vivante demeure en grande partie inchangée, la diversité des espèces diminue considérablement. Les joncs prospèrent dans les eaux douces acidifiées. La mousse 'Sphagnum Blanche' peut envahir les lacs et former un tapis vert épais sur le fond du lac à cause des eaux plus claires permettant à plus de lumière d'atteindre la mousse. Les animaux aux corps mous, tels que les sangsues, les escargots et les écrevisses, sont les premières victimes, souvent un des premiers signes du commencement de l'acidification. Peu d'espèces d'insectes sont très résistantes à l'acidification et les espèces telles que les mouches disparaissent même avec une acidification modérée. Cependant, les espèces telles que les larves de libellule, le coléoptère et les vers de vase peuvent développer une population anormalement grande quand il n'y plus de concurrence. Le saumon, la truite et le gardon sont particulièrement mis en danger par l'acidification de l'eau douce ; le brochet et l'anguille étant quant à eux relativement résistants. Les métaux toxiques qui ont réagi dans le sol avec les pluies acides sont amenés par ruissellement et par les nappes phréatiques dans les eaux des lacs provoquant l'augmentation de la mortalité et la diminution de la reproduction étant donné le manque d'oxygène et de minéraux (Figure 55)(Pidwirny and Jones, 2009; Delmas *et al.*, 2010).

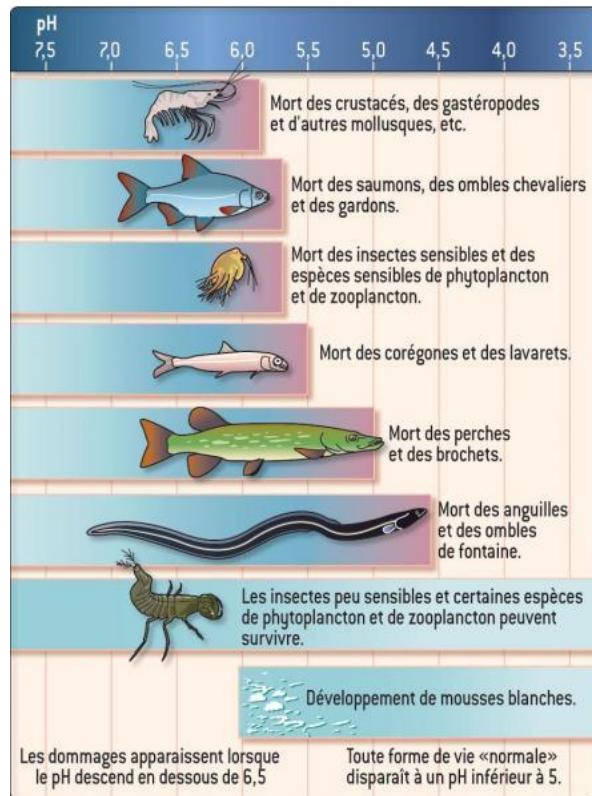
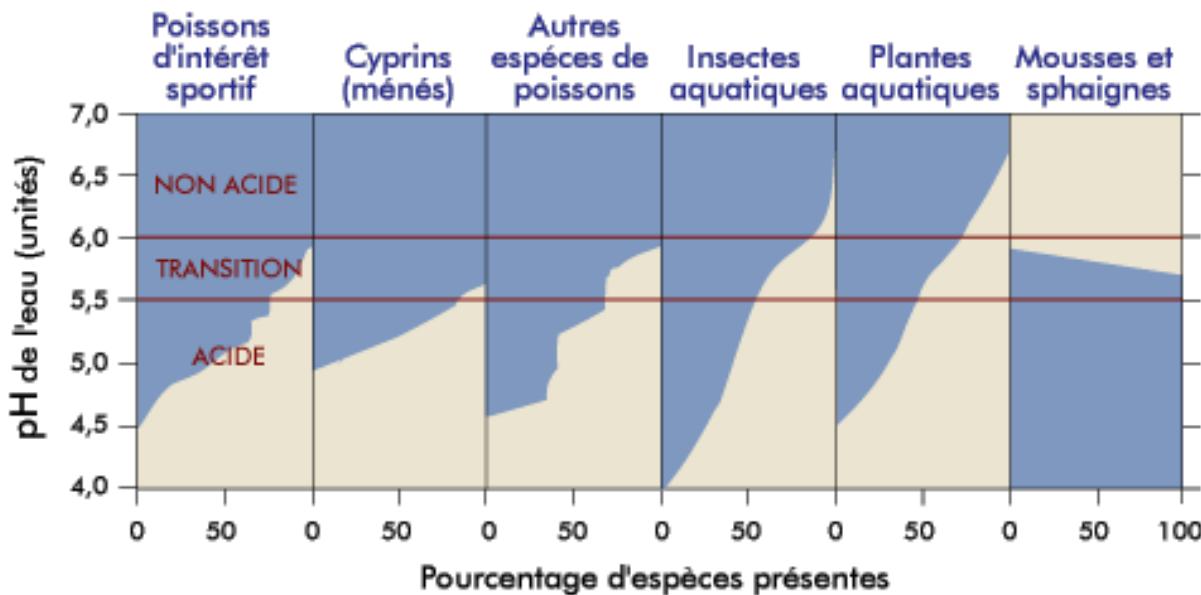


Figure 55 Influence des pluies acides sur les systèmes aquatiques selon le degré d'acidification.

e. Exemple au Québec

Un lac assure généralement l'intégrité de son écosystème tant que le pH se maintient entre 6 et 8,5 unités. Lorsque le pH passe de 6 à 5,5, les organismes aquatiques les plus intolérants à l'acidité disparaissent du milieu. C'est le cas des « menés » ou cyprins, de certaines plantes aquatiques comme les macrophytes et de certains invertébrés comme les moules et les écrevisses. Lorsqu'un pH atteint 5,5, 25 % des espèces de poissons ont disparu. Entre 5,5 et 5 unités pH, les dommages biologiques s'accélèrent. Lorsque le pH atteint 5 unités, il ne reste plus que 25 % des espèces de poisson d'origine. Les plantes sont remplacées par des mousses et des sphagnes. Seules les espèces d'insectes les plus tolérantes résistent encore. Plusieurs espèces sportives comme le touladi et le doré jaune ont disparu. Même l'omble de fontaine ne réussit plus à se reproduire. Lorsque le pH descend sous la barre des 5 unités, seuls les plus gros individus peuvent survivre et éventuellement disparaissent au terme de leur cycle de vie. La restauration biologique doit donc survenir avant leur éradication complète (Figure 56)(Dupont, 2004).



Ministère de l'Environnement, 2004

Figure 56 Effets du pH sur la diversité des espèces animales et végétales au Québec

4. Smog photochimique et chimique

a. Généralités

Le smog est un terme anglophone pour *smoke* et *fog* qui est apparu dans les années 50 pour désigner le brouillard épais de Londres formé par les émissions de SO₂ en ville. Cette formation acide est le smog chimique froid et humide en opposition au smog photochimique qui requiert de l'ensoleillement et de la chaleur.

Le smog photochimique (ou smog d'été) se situe au niveau de la troposphère donc en plus basse altitude que l'ozone stratosphérique (Figure 57). Il apparaît en présence d'une masse stationnaire d'air chaud peu humide chargé de polluants atmosphériques primaires nocifs (oxydes d'azotes NO_x et d'hydrocarbures oxydables) qui réagissent au contact de radiations solaires intenses pour former des polluants secondaires, l'ozone et les particules fines, substances chimiques toxiques pour l'humain. Ces conditions se rencontrent en milieu urbain à cause de la génération, par les automobiles et les procédés industriels, d'une grande quantité de NO_x et d'hydrocarbures imbrûlés (COV composés organiques volatils). Des sources naturelles d'hydrocarbures oxydables existent dans les forêts de pins mais l'intensité est bien plus faible qu'en milieu urbain où le NO_x amplifie le smog.

Le smog chimique (ou smog d'hiver) est causé par une forte concentration de particules fines retenues au sol lorsqu'il n'y pas de vent et qu'un gradient de température est observé dans la journée. Il résulte de l'abondance des particules de suie et de la production de SO₂ par la combustion de charbons soufrés. Cependant, depuis les années 80, le chauffage au bois et le poêle à combustion lente, l'activité industrielle et le transport ont amplifié la formation de ce smog.

Le smog engendre une irritation des yeux et des voies respiratoires, de la toux, une aggravation des symptômes chez les personnes atteintes de maladies cardiorespiratoires (asthme, bronchite...) et le décès prématuré d'adultes atteints de ces maladies chroniques. (EPA, 2014; RSQA - Ville de Montréal, 2017)

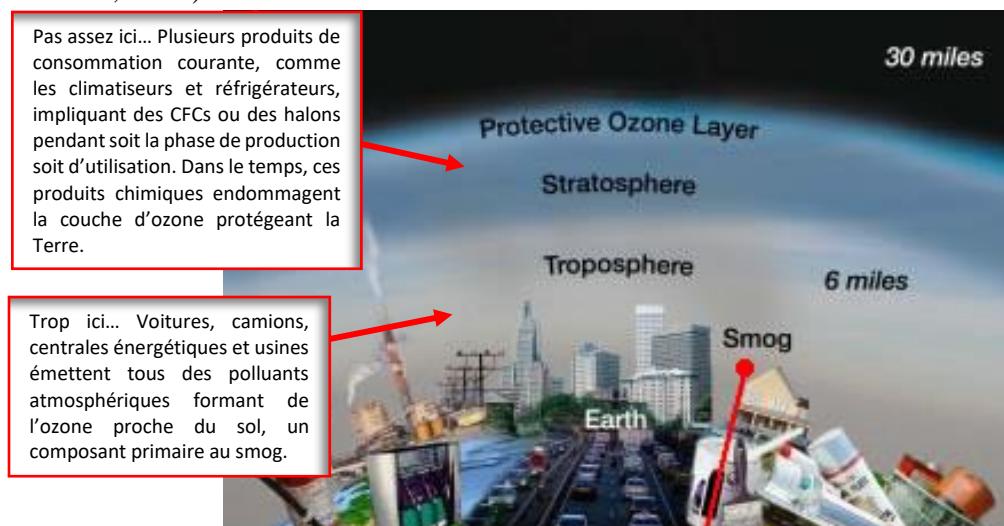


Figure 57 Différences entre le « bon » et le « mauvais » ozone selon les strates de l'atmosphère

La première chose à comprendre c'est que les rayons UV, ceux aux longueurs d'onde qui pénètrent jusqu'à la troposphère (l'air que nous respirons), effectuent la photolyse du NO₂ en NO. À l'état naturel, sans pollution, il y a toujours un niveau de fond d'ozone, qui est formé quand O₂ réagit avec O (produit lors de la photolyse de NO₂). Cet ozone ne s'accumule pas, il réagit ensuite avec NO et redonne O₂ et NO₂, c'est ce qu'on appelle le cycle de Chapman. Le niveau de fond est d'environ 40 ppb (80 µg/m³).

Le smog est un phénomène complexe et non linéaire. La formation d'ozone est provoquée par la présence de NO_x (NO+NO₂) et d'hydrocarbures lors de journées ensoleillées. Mais sa formation n'est pas directement proportionnelle aux concentrations de NO_x et d'hydrocarbures. C'est pour cette raison que l'on a recours à la modélisation pour quantifier le phénomène, mais aussi parce que les concentrations d'ozone sont dépendantes du transport des polluants et donc des conditions météo.



Figure 58 Pékin sous l'effet du smog, fréquemment observé²⁰

Les grands centres urbains sont donc les principales zones touchées par le smog, Los Angeles, Mexico, Paris, New-York et surtout les grandes villes chinoises, qui émettent des centaines d'alertes chaque année, sont fréquemment cités. Au Canada, le corridor Windsor-Québec, le sud des provinces de l'Atlantique et la vallée inférieure du Fraser, en Colombie-Britannique, font état de problématiques de smog. En ce qui concerne l'environnement, les niveaux élevés d'ozone causent notamment des pertes agricoles évaluées à près de 70 M\$ en Ontario et à 9 M\$ dans la vallée inférieure du Fraser, en Colombie-Britannique. (Gouvernement du Canada, 2014)

Au Québec, en 2008, sur les 275 500 tonnes émises de NO_x, 76% proviennent des transports et sur les 305 200 tonnes de COV, le plus gros contributeur à 37% est également le transport. Les émissions de ces substances sont principalement d'origine anthropiques et liées au transport et aux industries. La combustion du charbon, de l'essence et du mazout provenant des véhicules, des résidences, des industries et des centrales électriques représentent la majorité des émissions de NO_x. Les COV découlant de l'activité humaine proviennent principalement de la

²⁰ Sources : <http://www.thetruthaboutcars.com/> et <https://holykaw.alltop.com/>

commercialisation et de la combustion incomplète de l'essence, de la production en amont du gaz et du pétrole, du chauffage au bois résidentiel et de l'évaporation des combustibles liquides, évaporation d'essence aux stations-service, revêtements de surface (peintures à l'huile) et des solvants (Figure 59)(Paradis, 2011).

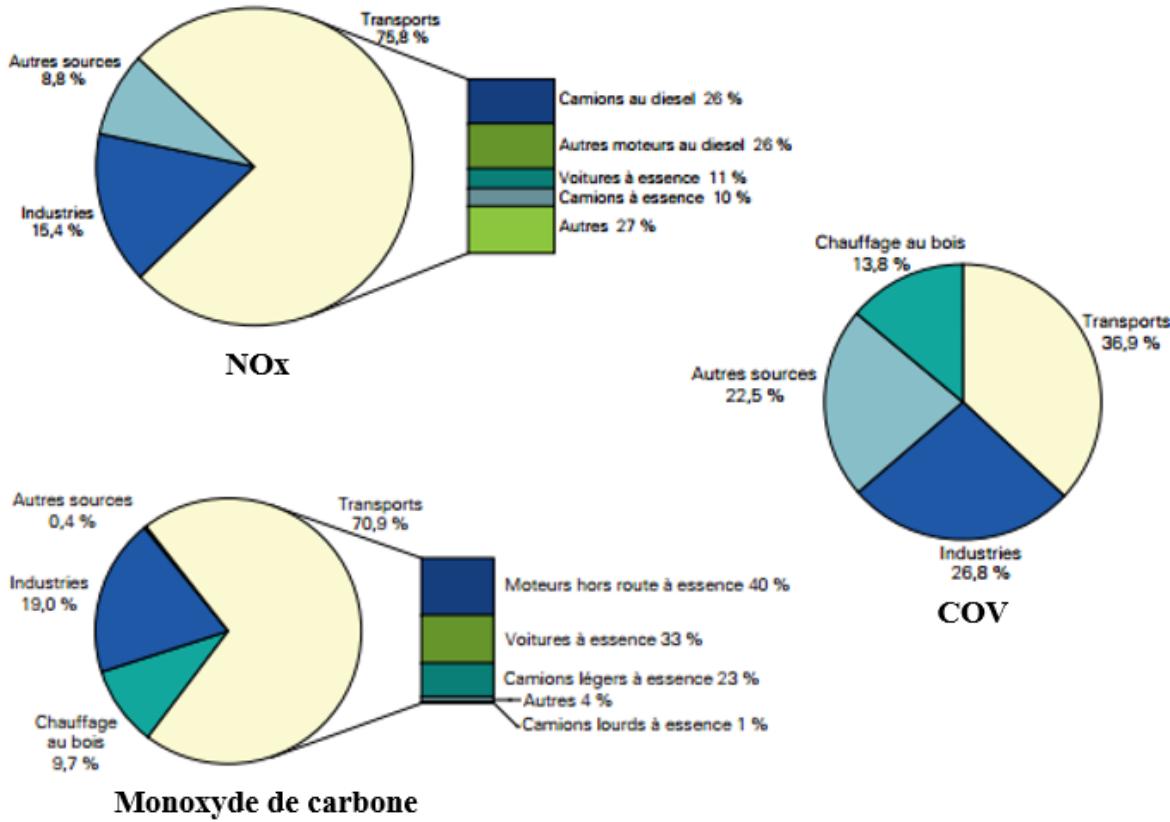


Figure 59 Substances responsables du smog photochimique au Québec par secteur d'émissions

Les polluants atmosphériques n'ont pas forcément une origine locale et peuvent également découler d'émissions transfrontalières. Au Québec, il a été observé du smog en raison des activités de la province mais également à cause de l'apport par le vent de polluants provenant du sud de l'Ontario ou du centre et du nord-est des États-Unis.

b. Distinction du smog d'été (« Los Angeles-type ») et du smog d'hiver (« London-type »)

Quand il s'agit de smog il est important de ne pas confondre les deux types de smog existants qui diffèrent par les conditions météorologiques et les substances les provoquant (Figure 60). Le smog d'été se présente lorsque les plus fortes concentrations d'ozone sont observées entre mai et septembre, durant les après-midis très chaudes et ensoleillées ; il se produit lorsque le vent est faible, en aval des grandes zones urbaines par rapport aux vents dominants.

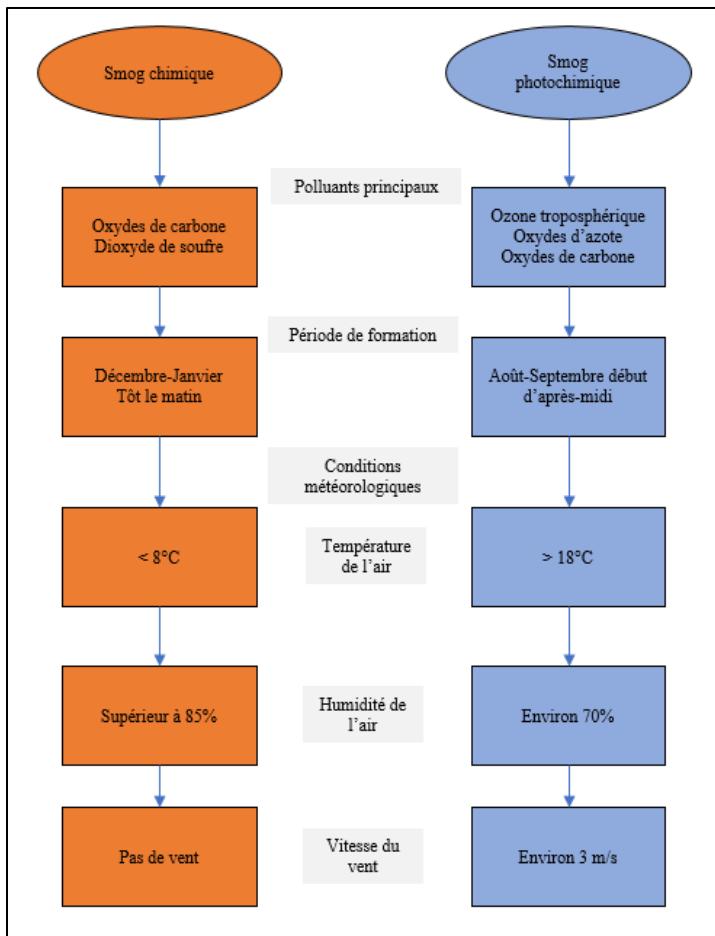
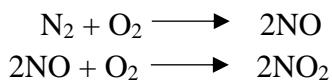
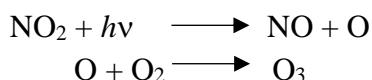


Figure 60 Les deux types de smog et leurs conditions de formation

Dans la troposphère, les molécules N₂ et O₂ sont abondantes et stables (78% et 21% respectivement). Les décharges électriques provenant des orages conduisent à la fabrication naturelle des oxydes d'azote NO_x. Dans les moteurs à explosion, les pressions et températures élevées transforment l'azote et l'oxygène en oxyde d'azote qui, une fois dans l'atmosphère, s'oxyde rapidement en dioxyde d'azote (NO₂).



La lumière du soleil est une source d'énergie (*hv*) qui alimente les réactions de certains polluants dans l'atmosphère. Les oxydes d'azote (NO_x) et les composés organiques volatils (COV) interagissent en présence de la lumière du soleil. En absorbant l'énergie lumineuse, le dioxyde d'azote (NO₂) se décompose en monoxyde d'azote (NO) et en oxygène monoatomique (O). L'oxygène monoatomique réagit vivement avec l'oxygène moléculaire (O₂) présent dans l'atmosphère pour former de l'**ozone** (O₃). Ces réactions sont représentées par les équations suivantes :



Les produits de ces deux réactions sont instables. Par conséquent, en l'absence d'autres facteurs, l'ozone (O_3), le monoxyde d'azote (NO) et l'oxygène monoatomique (O) réagissent pour former du dioxyde d'azote (NO_2) et du gaz oxygène (O_2) ; il en résulte un équilibre chimique de l'ozone. Autrement dit, il n'y a pas d'augmentation significative de la quantité d'ozone. Pendant les mois chauds, la concentration d'ozone dans l'air non pollué varie de 20 à 50 parties par milliard (ppb).

Les hydrocarbures gazeux et ceux partiellement oxydés constituent les COV présents dans l'air à cause de l'évaporation des solvants ou de carburants liquides entre autres. Les vapeurs d'essence émanant des pistolets des stations-services ainsi que l'essence non brûlée sortant du tuyau d'échappement en sont des bons exemples. En présence de COV, le monoxyde d'azote et l'oxygène monoatomique réagissent avec eux plutôt qu'avec l'ozone et produisent de nombreux composés nocifs et réactifs. Puisque le monoxyde d'azote et l'oxygène monoatomique réagissent avec les COV, l'ozone s'accumule. C'est pour cela que l'ozone est la principale composante du smog. Comme la lumière du soleil est un élément essentiel aux réactions chimiques qui produisent le smog, on appelle ce phénomène le **smog photochimique** (Figure 61). Les produits des réactions photochimiques, comme l'ozone et l'acide nitrique, résultent de réactions entre des polluants primaires (directement émis par une source de pollution); on les appelle donc des « polluants secondaires ».(Green, 2014)

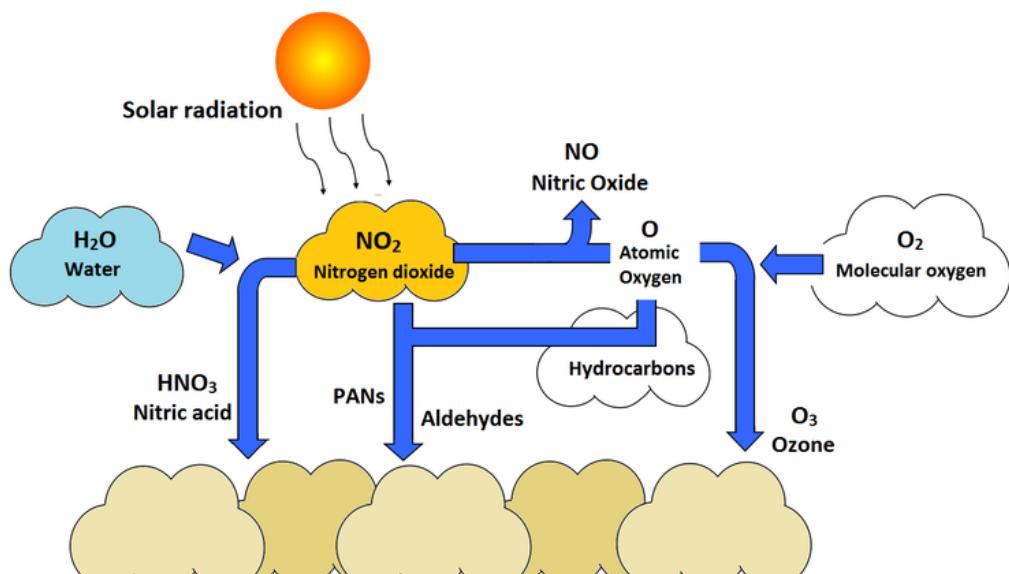


Figure 61 Smog photochimique²¹

Le cycle quotidien du smog est très cadencé et similaire selon les aires urbaines. En effet, en début de journée, les concentrations d'oxydes d'azote et d'ozone sont basses avant que deux sources majeures de monoxyde d'azote viennent perturber ceci. Il s'agit de la circulation automobile intense de l'heure de pointe du matin qui libère des monoxydes d'azote (NO) ainsi que la présence d'acide nitreux (HNO_2), qui se décompose au retour du soleil engendrant une augmentation de NO

²¹ Source : http://energyeducation.ca/encyclopedia/Photochemical_smog

et OH. Ces molécules de NO réagissent avec l'oxygène moléculaire pour former le dioxyde d'azote. En milieu de matinée, sous l'effet du soleil, le NO_2 se décompose pour former l'ozone. Les hydrocarbures accumulés la nuit et réémis le matin venu réagissent vers midi avec les molécules d'OH ainsi qu'avec l'ozone pour former des aldéhydes et des cétones qui en après-midi mène à la formation du nitrate de peroxyacétyle (PAN) responsable des difficultés respiratoires et de l'irritation des yeux. Le soir venu, les réactions radicalaires sont interrompues et les molécules stables sont reformées avec l'obscurité menant à l'accumulation de l'acide nitrique, l'acide nitreux et les hydrocarbures avant de réagir de nouveau le lendemain. (Figure 62)(Baird and Cann, 2016)

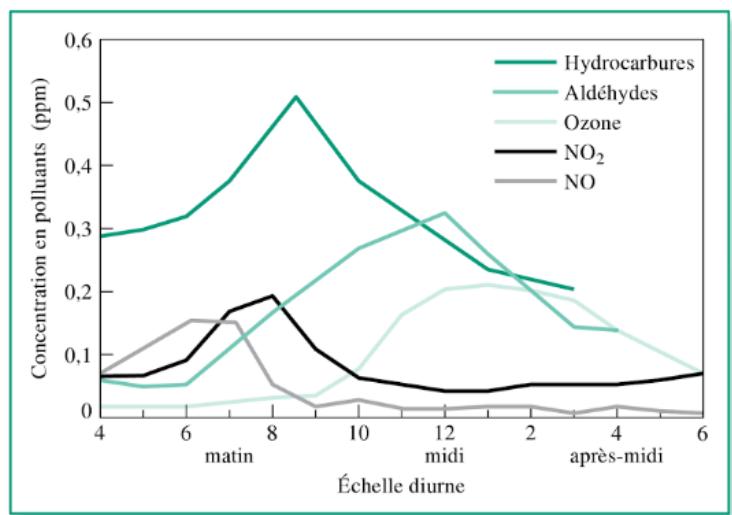


Figure 62 Évolution journalière typique des concentrations en polluants primaires et secondaires responsables du smog photochimique

De plus, durant les mois chauds de l'été, une condition supplémentaire accroît le niveau de smog photochimique, il s'agit de l'inversion des températures. Normalement, dans la troposphère, la température de l'air diminue avec l'altitude mais il arrive que l'air atmosphérique, réchauffé par les premiers rayons du soleil, empêche la masse d'air frais de la nuit de s'échapper la piégeant avec les émissions anthropiques polluantes, agissant comme un couvercle, jusqu'à uniformisation de la température atmosphérique. (Figure 63)(Green, 2014)

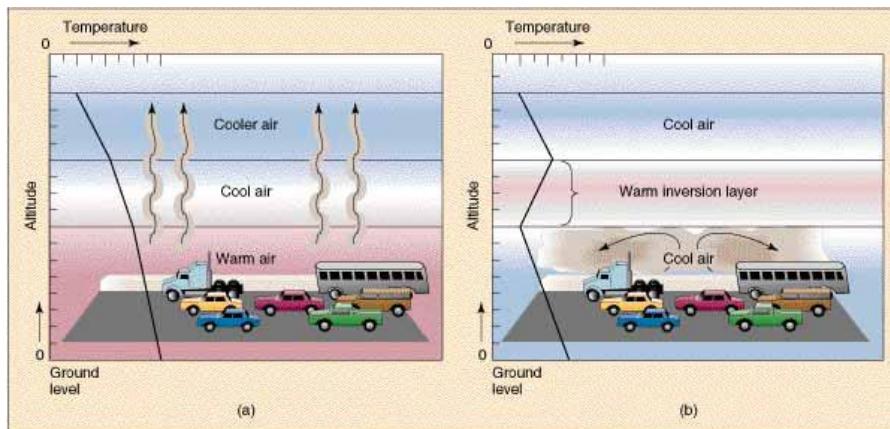


Figure 63 Processus d'inversion thermique comparé à l'état normal de la troposphère

c. Conséquences du smog

Le smog a principalement des effets néfastes sur la santé humaine mais également sur celle des écosystèmes et sur le bien-être socio-économique.

L'ozone est nocif pour la santé humaine (Figure 64)(Drouin, 2003). Les études suggèrent qu'une exposition à long terme à l'ozone peut causer une plus grande susceptibilité aux maladies respiratoires, des effets sur le système cardiovasculaire et un vieillissement prématué des poumons.(Environnement Canada, 2012)

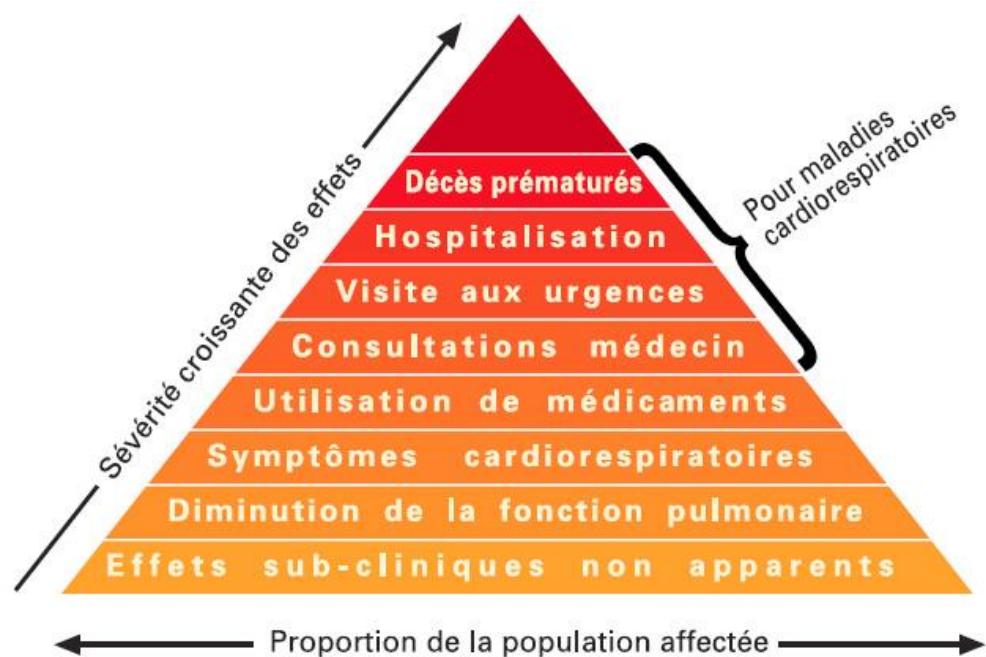


Figure 64 Pyramide des effets de la pollution atmosphérique sur la santé

L'ozone est absorbé par les espèces végétales causant des dommages physiques, au vieillissement prématué et réduisant sa capacité d'absorption du dioxyde de carbone. Les plantes sont très sensibles à l'augmentation des concentrations d'ozone troposphérique. Des ouvertures microscopiques à la surface de chaque feuille, appelées stomates, sont importantes pour l'échange naturel des gaz, y compris l'absorption du dioxyde de carbone. Lorsque l'ozone entre par les stomates, il peut perturber divers processus biochimiques et physiologiques, y compris la photosynthèse. Ainsi, l'écosystème s'en voit perturbé puisque les espèces résistantes à l'ozone deviennent dominantes et envahissent celles moins résistantes. L'ozone troposphérique peut endommager et même faire mourir les cellules des feuilles. Cet effet se traduit par l'apparition de petites taches noires ou brunes sur les plantes latifoliées, ou de taches jaunes (chlorotiques) sur les aiguilles des conifères. Même si les plantes peuvent réagir à l'augmentation des concentrations d'ozone troposphérique en fermant chaque stoma au moyen de cellules spécialisées appelées cellules de garde, cette réaction a aussi pour effet d'empêcher l'absorption de dioxyde de carbone, un gaz qui est essentiel à la photosynthèse et à la croissance des plantes, ce qui est particulièrement préoccupant pendant le jour, lorsque les concentrations d'ozone sont le plus élevées et que les

plantes ont le plus besoin de dioxyde de carbone. L'ozone endommage également la végétation et entraîne par conséquent une baisse de la productivité des cultures. Les haricots, les tomates, le tabac, les pommes de terre, le soja et le blé sont tous très sensibles à l'ozone

Les répercussions socio-économiques sont principalement reliées aux coûts des traitements médicaux et à la diminution de productivité des travailleurs affectés. Cependant, l'ozone a aussi une influence sur la production des exploitations agricoles et forestières diminuant la productivité. Les dommages aux cultures ont été estimés à 201 millions de dollars pour la province de l'Ontario. La réduction des activités récréotouristiques dû à la pollution et la réduction de visibilité dans la vallée du Fraser et dans la ville de Vancouver a amené une perte de revenus estimés à 8,77 millions de dollars. Finalement, le smog a des répercussions sur les bâtiments augmentant le rythme de détérioration des matériaux causant des rénovations plus fréquentes. De nombreux élastomères, par exemple des pneumatiques en caoutchouc, sont également fortement attaqués par l'ozone. De même, l'oxydation d'autres matières telles que les fibres textiles, la peinture, etc., est accélérée par l'ozone. (Environnement Canada, 2012)

Afin de protéger la santé humaine et la végétation, le Canada se conforme aux Standards pancanadiens avec un niveau maximum acceptable d'ozone de 65 parties par milliard (ppb) en moyenne sur 8 heures (CCME, 2012). Pendant les étés particulièrement chauds, les concentrations d'ozone dans certaines parties de l'Ontario et du Québec sont le double de la norme de qualité de l'air. Le Canada est cependant au-dessus de la concentration maximale acceptable de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (environ 51 ppb²²) pendant une période de 8 heures définie par l'Organisation Mondiale pour la Santé (OMS, 2005). La concentration d'ozone naturelle se situe à environ $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

²² Source : <http://www.eurofinsus.com/environment-testing/laboratories/eurofins-air-toxics/resources/unit-conversion-calculator/>

5. Eutrophisation

a. Généralités

Originellement, l'**eutrophisation** d'un milieu aquatique, tel que les cours d'eau ou les mares, désigne simplement son caractère *eutrophe* (du grec *eu* : « bien, vrai » et *trophein* : « nourrir »), c'est-à-dire riche en éléments nutritifs, sans caractère négatif. C'est même un processus naturel de vieillissement d'un milieu aquatique, dont la majorité des étendues d'eaux subie, le faisant passer d'un lac en un marais, d'un marais en une prairie, puis en une forêt le tout sur plusieurs siècles voire davantage. À partir des années 1970, le terme a été employé pour définir l'étouffement lent de grands lacs. Il existe deux types d'eutrophisation, la naturelle donc, et l'anthropique, provenant donc des activités anthropiques, qui accentuent et accélèrent l'effet de l'eutrophisation naturelle. Ainsi, les lacs, rivières et autres étendues d'eaux ont naturellement besoins de nutriments tels que les nitrates et les phosphates pour la croissance des plantes. Ces nutriments sont donc bénéfiques en petites quantités mais en trop larges quantités ils provoquent la pollution des eaux. Cette eutrophisation anthropique provoque une croissance excessive d'algues et de micro-organismes qui consomment l'oxygène présent, rendant le milieu hypoxique (pauvre en oxygène) voire anoxique (dépourvu d'oxygène) (Figure 65).



Figure 65 Étendue d'eau chargée d'algues sous l'effet de l'eutrophisation²³

Cette réduction d'oxygène provoque un stress sur la faune aquatique et son manque total mène à la mort et la disparition des espèces dans les eaux en question. Le phénomène s'amplifie alors puisque ces organismes aquatiques aérobies comme les insectes, les crustacés, les poissons par

²³Source : <https://www.macalester.edu/academics/environmentalstudies>

exemple consomment l'oxygène lors de leur décomposition. Les milieux touchés par l'eutrophisation sont aussi bien les milieux marins que continentaux :

- Les eaux calmes, tels que les lacs et les étangs
- Les cours d'eau à faible débit ou avec un apport de contaminants trop importants (proche d'exploitations agricoles ou industrielles majeures)
- Les golfes, baies et étendues semi-fermées

b. Sources et processus

Les sources majeures de rejets de ces nutriments en trop grandes quantités dans les eaux douces et les zones côtières proviennent des activités humaines, notamment l'agriculture, l'aquaculture, les fosses septiques et les eaux usées municipales et industrielles. Les sources agricoles incluent l'utilisation excessive d'engrais comportant de l'azote, du phosphore et du potassium et du fumier. L'aquaculture, via les fermes aquatiques, génère également une forte quantité de nutriments (azote et phosphore des excréments et déchets organiques). Les eaux usées urbaines sont une grande source de nutriments par la présence de polyphosphates dans les eaux usées des lessives et quand les fosses septiques ne sont pas connectées au système de traitement des eaux usées. La fonte des neiges et les averses intenses amènent les nutriments des pelouses privées dans les rivières. (Figure 66)(World Resources Institute, n.d.)

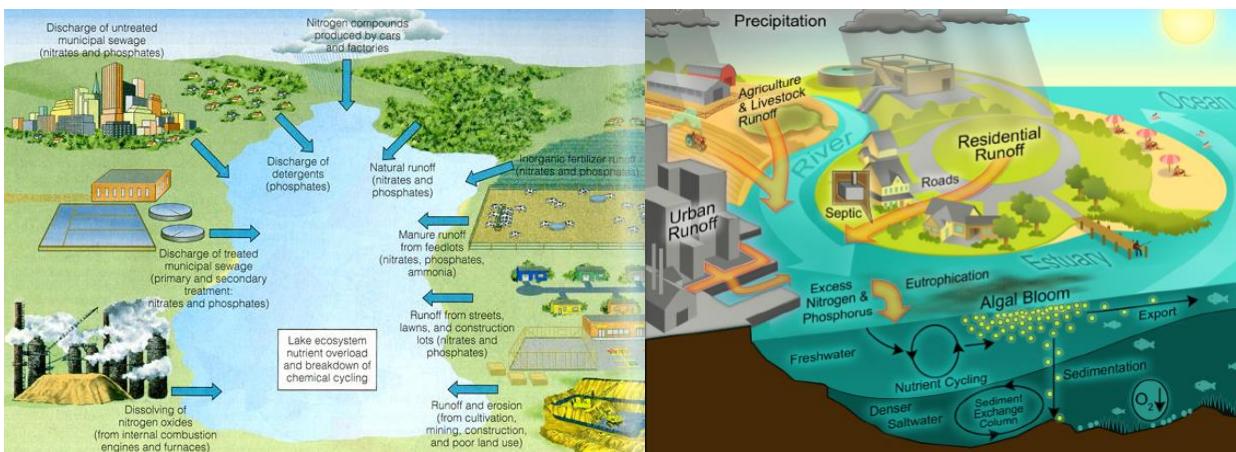


Figure 66 Sources principales des rejets de nutriments

Ainsi, après le rejet dans le milieu aquatique des nutriments issus des activités agricoles et des eaux usées majoritairement, les eaux du milieu voient une prolifération des végétaux aquatiques, notamment les algues et plantes flottantes, qui empêchent les zones les plus profondes de recevoir la lumière nécessaire à la photosynthèse et au dégagement d'oxygène résultant en un appauvrissement de cet oxygène rapidement consommé par les espèces vivantes. Par la suite, le manque d'oxygène provoque la mort d'espèces animales et végétales dont la décomposition accélère la raréfaction de l'oxygène menant le milieu à l'hypoxie puis à l'anoxie (Figure 67).

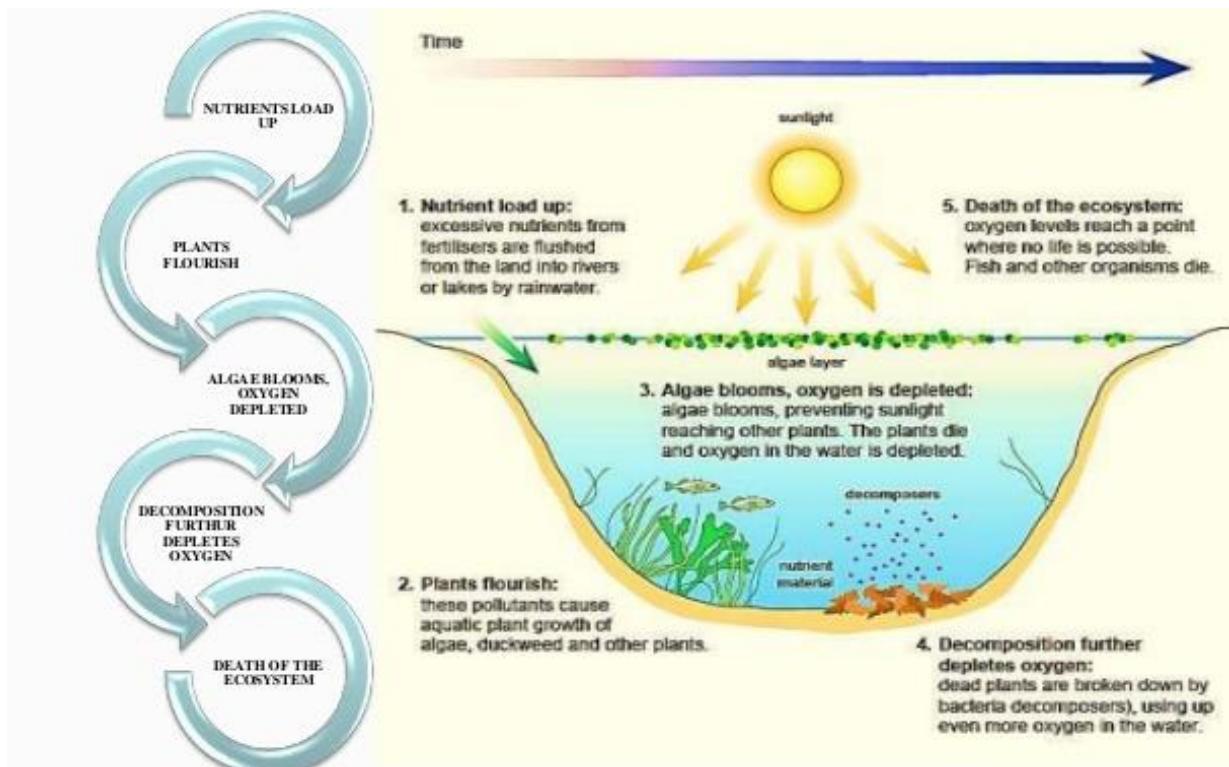


Figure 67 Processus d'eutrophisation

c. Conséquences de l'eutrophisation

Les principaux effets causés sont la diminution de la biodiversité, l'augmentation de la biomasse animale et végétale, la baisse de la durée de vie de l'étendue d'eaux à cause d'une augmentation du taux de sédiments, le développement anoxique amenant odeurs, perte de transparence et envasement. Il est observé les effets suivants :

- Augmentation de la biomasse algale ;
- Augmentation de la biomasse du zooplancton gélatineux ;
- Dégradation des qualités organoleptiques de l'eau (aspect, couleur, odeur, saveur) ;
- Développement de phytoplancton toxique, cyanobactéries ou algues bleues ;
- Diminution de l'indice biotique ;
- Diminution de la biodiversité (animale et végétale) ;
- Diminution de la concentration en dioxygène dissous ;
- Diminution du rendement de la pêche ;
- Mort des organismes supérieurs (insectes, cnidaires, crustacés, mollusques, poissons...)

Comme mentionné précédemment, ces étapes font partie d'un processus naturel mais qui nécessite un laps de temps bien plus important que ceux qui ont été observés à cause des activités humaines (Figure 68).

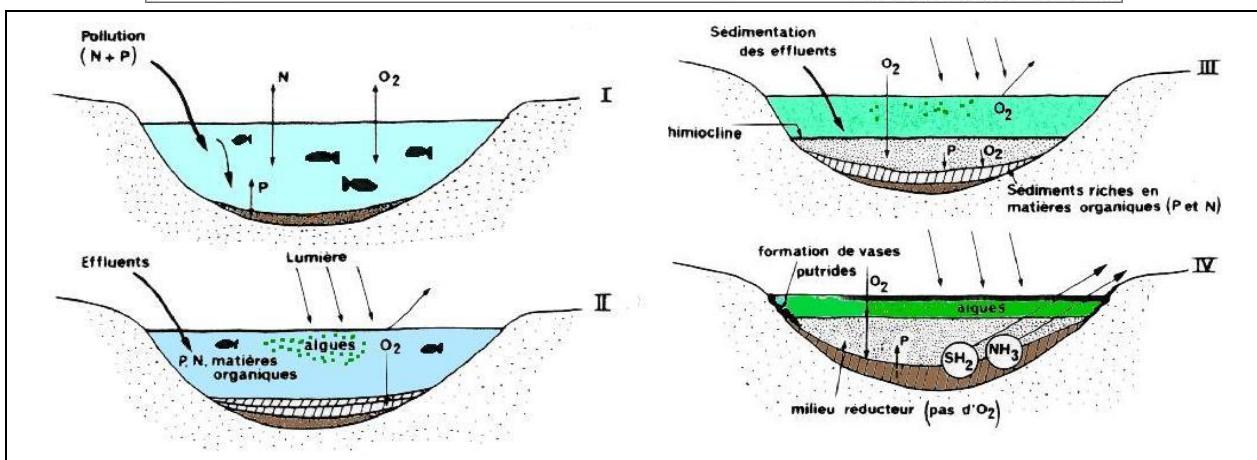
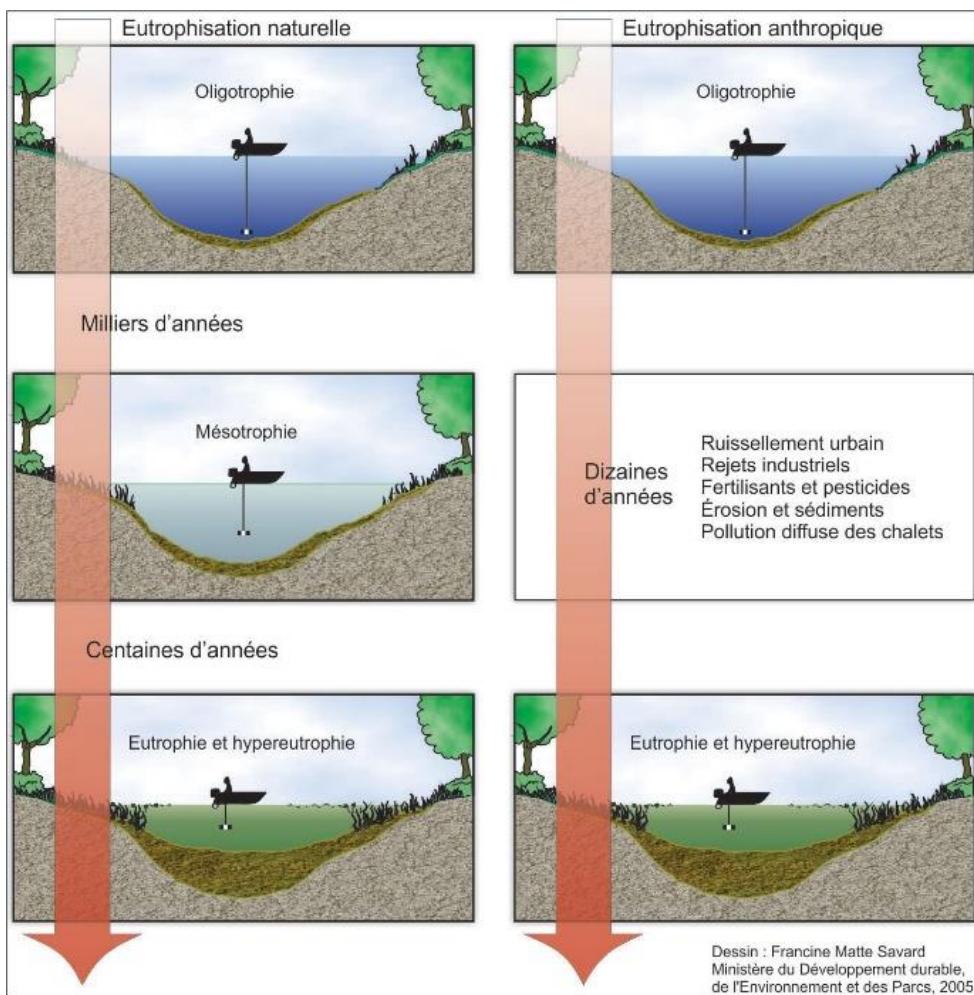


Figure 68 Transformation d'un lac en marais, en prairie puis en forêt à cause de l'eutrophisation

6. Toxicité humaine et écotoxicité

a. Généralités

Toxicologie : Discipline scientifique qui s'occupe des toxiques, de leurs propriétés, de leur devenir dans l'organisme, de leur mode d'action, de leur recherche dans différents milieux et des moyens (préventifs et curatifs) permettant de combattre leur nocivité.

Écotoxicologie : Toxicologie environnementale (pollution de l'air, des eaux, des sols) et leurs répercussions sur l'Homme et les équilibres biologiques. Elle est issue de la toxicologie de l'environnement, apparue peu après la Seconde Guerre mondiale, qui se souciait de l'impact des rejets toxiques sur l'environnement.

L'**écotoxicologie** est une discipline de l'écologie qui étudie le comportement et les effets toxiques d'agents d'origine anthropique sur les écosystèmes, ou bien d'agents d'origine naturelle dont l'Homme modifie la répartition dans les différents compartiments de la biosphère, à qui il est de plus en plus demandé de prévoir les effets de pollutions, en nature, en intensité et en durée. L'écotoxicologie est une jeune discipline. Le terme apparaît en 1974 inventé par René Truhaut. Elle tente de combiner deux sujets très différents : l'écologie et la toxicologie. L'écotoxicologie est "l'étude des effets nuisibles des produits chimiques sur les écosystèmes" (Walker *et al.*, 2012). En toxicologie classique, l'étude se limite aux organismes alors que l'écotoxicologie tente de mesurer l'impact des substances chimiques non seulement sur les individus, mais aussi sur les populations et les écosystèmes entiers.

b. Objectifs de l'écotoxicologie

Les objectifs sont multiples (Academic, 2016) :

- Obtenir des données sur les facteurs de risque et la gestion de l'environnement ;
- Établir les exigences légales pour le développement et l'élimination des nouveaux produits chimiques ;
- Développer des principes empiriques et théoriques pour améliorer la connaissance du comportement et des effets des produits chimiques dans les biosystèmes.

c. Cheminement d'un toxique dans l'environnement

Avant d'être en contact avec un organisme, le toxique peut se déplacer dans l'environnement. On parle donc de son transport ou **devenir** environnemental. Ce sont les caractéristiques physiques et chimiques du toxique ainsi que du milieu qui régissent ses déplacements. Ainsi, un composé très volatil aura tendance à se diffuser dans l'air alors qu'un composé soluble lui, se déplacera dans l'eau. Par exemple, des exploitations agricoles peuvent utiliser des herbicides chimiques sur leurs cultures et ainsi émettre dans l'environnement des produits toxiques (herbicides). Si l'herbicide est soluble, il aura tendance à se déplacer avec l'eau et pourrait ainsi se retrouver à plusieurs mètres ou km de la source d'émission.

Une fois distribué, on trouve une certaine concentration du composé毒ique dans tous les milieux environnementaux, qui deviennent ainsi des sources d'**exposition** pour les plantes, les animaux et l'être humain. Celui-ci absorbe le contaminant par différentes **voies d'exposition**, comme la **respiration**, l'**ingestion** d'eau potable ou des produits agricoles (légumes, viande, produits laitiers, poissons...). C'est donc par ces voies d'exposition que les substances entrent dans des organismes biologiques où ils peuvent causer des **effets** toxiques nocifs. (Figure 69)

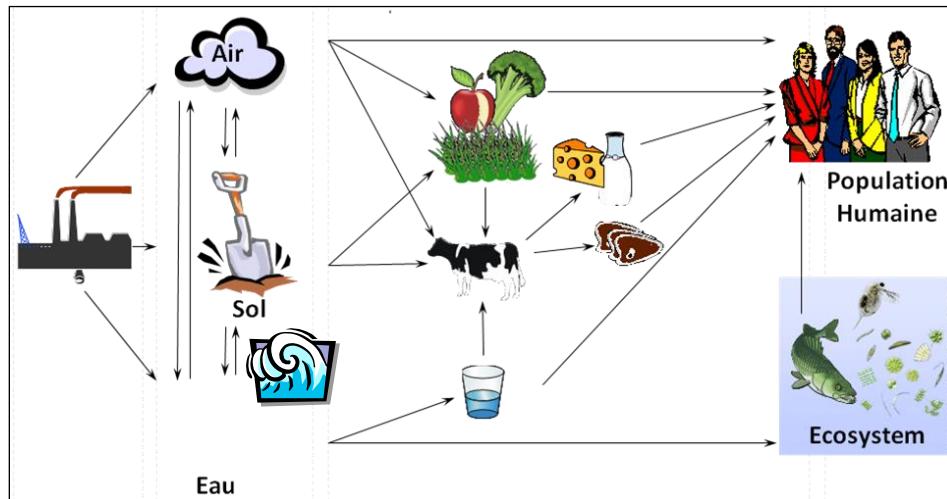


Figure 69 Chaîne de cause à effet d'une émission jusqu'aux effets sur la population humaine et les écosystèmes

d. Cheminement d'un toxique dans un organisme

Un produit qui a pénétré dans l'organisme peut agir sur celui-ci. On appelle les résultats de cette action les **effets**. Inversement, l'organisme peut agir sur ce produit ; c'est ce qu'on appelle le **métabolisme**. La réponse de l'organisme à un toxique dépend entre autres de la quantité du produit fixé aux points où il agit. Plusieurs facteurs interviennent dans les processus d'agression toxique, notamment les phases toxicodynamiques et toxicocinétiques. La **toxicodynamie** s'intéresse à ce qui influence la réponse de l'organisme en interférant avec le toxique à ses points d'action ou à ses effets, par exemple les maladies et la constitution biologique. Pour sa part, la **toxicocinétique** est axée sur ce qui influence la quantité de toxique fixé aux points d'action, soit l'absorption, la distribution, le métabolisme, l'élimination, la présence d'autres toxiques et les caractéristiques du toxique. Dans cette partie, il sera question du cheminement du produit toxique dans l'organisme (Figure 70), lequel suit quatre étapes principales :

- **L'entrée (ou l'absorption)**

On appelle absorption la pénétration des produits dans les membranes, les muqueuses, etc. Il s'agit d'une étape importante, car tant qu'il n'a pas pénétré dans la circulation sanguine, un produit ne peut causer d'action toxique générale ou systémique, c'est-à-dire à des points éloignés du lieu de contact initial.

Lors de la pénétration du toxique dans l'organisme, seule une fraction de la quantité absorbée se retrouve dans le sang. Divers facteurs peuvent influencer l'absorption : la nature du toxique, sa solubilité, la perméabilité des tissus biologiques, la durée et la fréquence de l'exposition, etc.

- **Le transport et la distribution (ou la répartition)**

Après avoir pénétré dans la voie sanguine, le produit peut ainsi être transporté dans tout l'organisme. C'est ce qu'on appelle la distribution.

En plus de véhiculer de l'oxygène, des déchets et les divers éléments nutritifs essentiels au fonctionnement de l'organisme, le sang transporte aussi des toxiques. Ceux-ci peuvent alors entrer en contact avec les cellules et les tissus et se fixer de préférence dans certains de ces tissus. Par exemple, les pesticides organochlorés se concentrent dans les tissus adipeux. Ils peuvent y rester emmagasinés sans causer de perturbation pendant une période plus ou moins longue, avant d'être retournés à la circulation pour finalement rejoindre d'autres tissus, où ils seront transformés ou pas. Une perturbation du fonctionnement peut alors s'ensuivre.

La nature, l'intensité et la localisation de ces perturbations dans l'organisme produisent ce qu'on appelle l'effet toxique.

- **La transformation (ou le métabolisme)**

Pendant ou après son transport dans le sang, le toxique peut entrer en contact avec les différentes cellules de l'organisme. Des réactions peuvent se produire et transformer le produit ou pas.

L'ensemble de ces réactions de transformation est appelé **métabolisme**, tandis que les produits ainsi transformés sont appelés métabolites. Il peut en résulter une accumulation ou une élimination du produit et de ses métabolites.

La transformation des toxiques est surtout effectuée par le foie, véritable laboratoire chimique de l'organisme, qui exerce une action essentielle au maintien de la vie. Il enrichit le sang d'éléments nutritifs et l'aide à se purifier en concentrant et en éliminant beaucoup de substances.

Le foie peut fabriquer des produits nécessaires au fonctionnement de l'organisme et il a la capacité de détruire ou de transformer les toxiques.

- **La sortie (ou l'élimination)**

Cette étape consiste à rejeter le produit inaltéré ou ses métabolites à l'extérieur de l'organisme. L'**élimination** peut se faire par voie rénale (l'urine), gastro-intestinale (les selles), pulmonaire (l'air expiré) ou cutanée (la sueur).

Le sang transporte de nombreux produits aux reins, dont plusieurs déchets provenant du métabolisme. Les reins filtrent le sang, remplissant ainsi une fonction essentielle au maintien de l'équilibre des éléments sanguins.

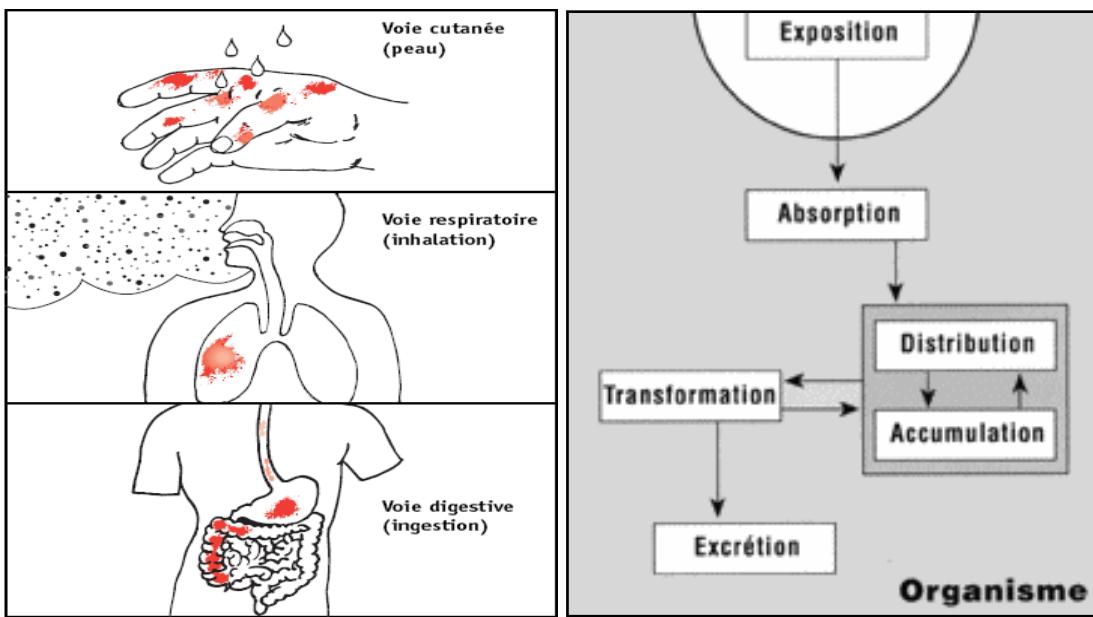


Figure 70 Les voies d'exposition (gauche) d'un produit dans l'organisme et son cheminement après l'entrée (droite)

e. Mesure de la toxicité des composés chimiques

NOEC – Concentration sans Effet Observé (No Observed Effect Concentration) : La concentration sans effet observé est celle qui ne provoque pas d'effet observé chez l'ensemble des animaux en expérimentation soumis à la substance essayée.

NOAEL – Dose sans Effet Adverse Observé (No Observed Adverse Effect Level) : La dose sans effet adverse observé est celle qui ne provoque pas d'effet observé chez l'ensemble des animaux en expérimentation soumis à la substance essayée.

CL₅₀ ou CE₅₀ – Concentration Létale ou Efficace (Lethal or Effective Concentration – LD or ED 50) : Dans des conditions de milieu et de température conventionnellement choisies, on définit la concentration en substance chimique qui, en **24 heures** de contact, tue **50%** de la population animale mis en expérimentation. Il s'agit d'un essai statique sans renouvellement du milieu.

DE₅₀ – Dose Efficace (Effective Dose – ED) 50 : La dose efficace 50 est celle qui provoque un type d'effet clairement défini (irritation des voies respiratoires, sommeil, altérations hépatiques ou rénales, perturbations sanguines, troubles neuromusculaires, etc.) chez la moitié (50%) des animaux en expérimentation soumis à la substance essayée.

DL₅₀ – Dose Létale (Lethal Dose – LD) 50 : La dose minimum mortelle chez l'animal, ou dose létale, est toujours délicate à déterminer de façon précise. On préfère établir la DL₅₀ définie comme "l'estimation statistique d'une dose unique de produit supposée pour tuer 50 % des animaux" en expérimentation.

L'essai est pratiqué habituellement sur 5 ou 6 lots d'animaux. Chaque animal d'un même lot reçoit une dose identique (dose unique) de la substance à tester, mais la dose administrée est différente d'un lot à l'autre, afin que le pourcentage de mortalité varie entre 0 et 100. La voie d'administration

est celle qui sera utilisée en clinique s'il s'agit d'un médicament (voie orale, injection, etc.) ou celle par laquelle la substance pourra pénétrer dans l'organisme s'il s'agit d'un produit chimique (voie orale, inhalation, voie transcutanée). Après l'administration, les animaux sont observés pendant 14 jours, au cours desquels les examens cliniques sont fréquents. L'instant et les circonstances de la mort sont soigneusement notés. Les animaux demeurés vivants à la fin de l'essai sont sacrifiés. Tous les animaux (morts en cours d'essai et sacrifiés en fin d'essai) font l'objet d'une autopsie.

On construit ensuite la courbe donnant le pourcentage de mortalité en fonction du logarithme de la dose. C'est une courbe en "S", dite courbe de Trévan, qui peut être linéarisée par des moyens appropriés. On en déduit la DL₅₀ (exprimée en mg par kg de poids corporel), dont on calcule aussi l'écart-type.

À titre d'exemple, pour une substance administrée par voie orale on considère que :

- si la DL₅₀ est ≤ 5 mg/kg, le produit est super toxique;
- si la DL₅₀ est comprise entre 5 et 50 mg/kg, le produit est extrêmement toxique;
- si la DL₅₀ est comprise entre 50 et 500 mg/kg, le produit est très toxique;
- si la DL₅₀ est comprise entre 0,5 et 5 g/kg, le produit est modérément toxique;
- si la DL₅₀ est comprise entre 5 et 15 g/kg, le produit est légèrement toxique;
- si la DL₅₀ est ≥ 15 g/kg, le produit n'est pas toxique ou très peu.

Source : (Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail, 2017)

7. Utilisation des terres

Depuis le début de son existence, l'Homme a modifié son environnement et s'est accaparé les terres biologiquement productives sur lesquels il vit aux dépens d'autres espèces. La modification de l'environnement naturel par l'Homme pour le transformer en un milieu anthropisé est en majorité due à l'exploitation des terres à des fins de culture. Cette exploitation augmente conjointement avec l'augmentation de la population via l'élevage massif de bétail et la production de biocarburants aggravant la problématique. L'industrialisation, l'urbanisation et la construction d'infrastructures de transport réduisent également la superficie de terres cultivables et d'écosystèmes naturels. Aux États-Unis, dans les années 1970, on estimait qu'environ 400 000 ha par an de terres cultivées étaient convertis à des usages non agricoles. On évaluait déjà à quelques 260 000 km² la surface qui avait été stérilisée par divers "aménagements". À l'heure actuelle, cette surface excède 600 000 ha par an.

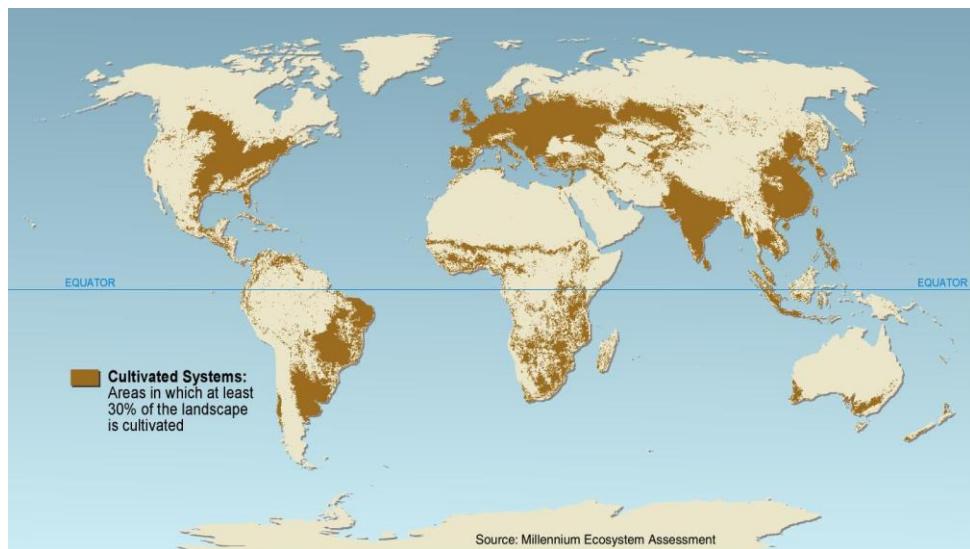


Figure 71 Les zones cultivées par l'Homme en 2000

L'utilisation des terres représente une des altérations humaines majeures du système Terre engendrant de nombreux impacts (Vitousek *et al.*, 1997) :

- Perte de biodiversité
- Dégradation des services rendus par les écosystèmes
- Perturbation des cycles biogéochimiques
- Dégradation du potentiel agricole des sols
- Perte de paysages uniques...

Ceci explique le grand nombre de conventions et ententes sur le sujet : Convention sur la diversité biologique (Rio de Janeiro, 1992), Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (Paris, 1994), Convention sur la conservation des espèces migratrices appartenant à la faune sauvage (Bonn, 1979), Convention relative aux zones humides d'importance internationale (Ramsar, 1971), etc.

8. Épuisement des ressources

Tout d'abord, il est important de savoir interpréter les termes que l'on peut trouver lorsqu'il s'agit de ressource. En effet, les ressources représentent les quantités totales retrouvées sur Terre pour un élément particulier (pétrole par exemple) tandis que les réserves sont les quantités de ressources **exploitables** pour un élément donné. Ainsi, la quantité en réserves est forcément inférieure aux ressources à cause de contraintes d'exploitations qui peuvent être économiques, technologiques ou physiques. En effet, il peut s'avérer impossible d'exploiter une ressource en raison de la difficulté d'accès à celle-ci, du coût élevé que cela engendrait ou encore parce que la quantité présente est trop petite pour en valoir la peine.

Une ressource naturelle est qualifiée de **non renouvelable ou épisable** lorsque le temps nécessaire à sa création dépasse largement le temps d'une vie humaine (Figure 72). Le pétrole en est une bonne illustration car sa consommation est plus rapide que sa régénération. À contrario, on parle de ressource **renouvelable** lorsque sa production est possible sur un temps court (production animale, végétale, etc.) ou lorsque la consommation n'épuise pas la ressource (énergie marémotrice, énergie éolienne, énergie solaire, etc.).

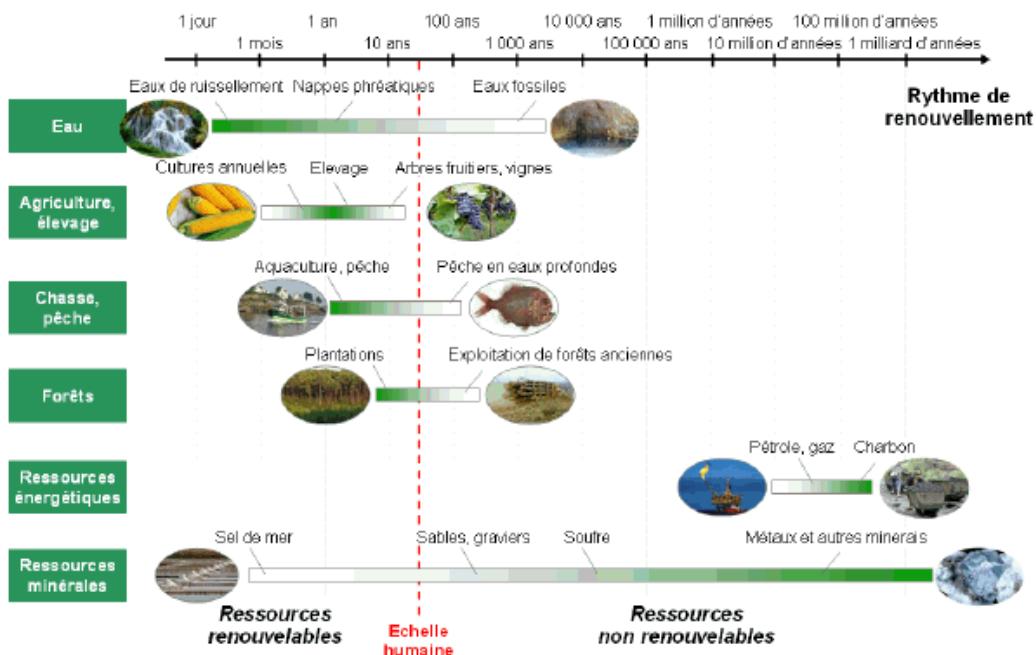


Figure 72 Ressources renouvelables et non renouvelables

a. Énergies non renouvelables

Parlons tout d'abord des **énergies non renouvelables** qui, par opposition aux énergies renouvelables (énergie solaire, éolienne, marémotrice, etc.), sont celles qui ne se renouvellent pas du tout ou pas suffisamment rapidement à l'échelle de l'humanité pour être considérées comme inépuisables. Deux grandes familles d'énergies non renouvelables permettent de les classer, les combustibles fossiles et l'énergie nucléaire.

Les **combustibles fossiles** (charbon, pétrole, gaz naturel, etc.) proviennent de la dégradation de la matière organique végétale et animale. Ils se sont formés il y a des millions d'années et leur vitesse de régénération étant lente, par rapport à la consommation intensive post-révolution industrielle qui en est faite, les risques d'épuisement à moyen terme ne sont plus à démontrer. En effet, cela prendrait à nouveau 60 millions d'années²⁴ pour que le processus de dégradation s'effectue et fournisse ces hydrocarbures et que l'épuisement des réserves actuellement connues est estimé avant la fin du XXIe siècle (Figure 73).

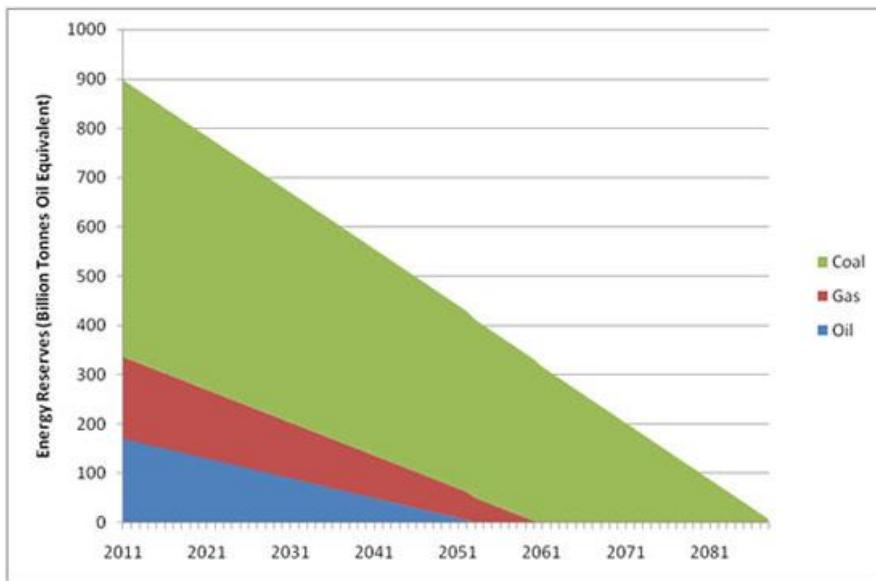


Figure 73 Évolution des réserves mondiales d'hydrocarbures²⁵

Les combustibles fossiles sont appelés des hydrocarbures car ils sont principalement constitués d'atomes de carbone et d'hydrogène. Leur combustion permet de dégager de l'énergie utilisée quotidiennement pour se déplacer, se chauffer, s'éclairer, cuisiner et pour des activités industrielles où ils servent à synthétiser des produits chimiques entrants dans la fabrication des plastiques, des engrangements, médicaments, etc.

Le pétrole et le gaz naturel proviennent de débris organiques majoritairement d'origine végétale (planctons et algues) qui s'accumulent et se décomposent au fond des mers par l'action bactérienne et des processus physico-chimiques particuliers. Au fil du temps, des couches de sédiments se déposent sur la matière organique augmentant la température et la pression (30 °C par kilomètre) menant la transformation de la matière organique en kérogrène. Celui-ci subit d'autres transformations (rupture liaisons hétéroatomiques avec des atomes d'oxygène, de soufre ou d'azote, expulsion de produits légers CO₂, N₂, H₂O, polycondensation puis craquage des molécules restantes) pour mener à la formation de différents hydrocarbures de plus en plus légers

²⁴ Source : <http://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/la-genese-des-gisements-d-hydrocarbures>

²⁵ Source : <https://www.ecotricity.co.uk/our-green-energy/energy-independence/the-end-of-fossil-fuels>

à mesure que la profondeur augmente comme le pétrole ou le gaz naturel. (Partie gauche de la Figure 74)(Smith *et al.*, 2007)

Le charbon quant à lui provient de débris végétaux partiellement décomposés au fond des marais et des forêts durant plusieurs millions d'années dans des conditions de chaleur et de pression particulières. Initialement conservée sous forme de tourbes (environnement avec une eau peu profonde et faible de dioxygène) l'accumulation des sédiments (sable, limon et boues) provoque l'augmentation de la pression et de la température et donc par l'houillification extrêmement lente mène à la formation de différents charbons de plus en plus riche en carbone. (Partie droite de la Figure 74)(Smith *et al.*, 2007)

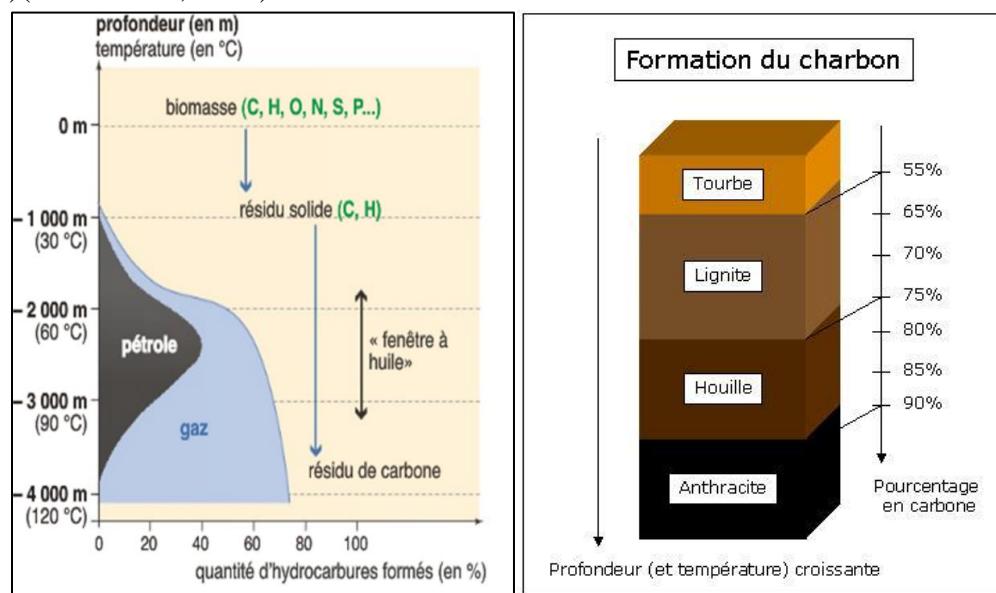


Figure 74 Variation des quantités d'hydrocarbures en fonction de la profondeur et la température²⁶ (à gauche) et les différents types de charbons selon les conditions²⁷ (à droite)

La société actuelle repose en majorité sur l'exploitation et l'utilisation de ces énergies fossiles et son épuisement à moyen terme dû à sa consommation intensive combinée aux méfaits de sa combustion (voir pollution atmosphérique) posent les enjeux majeurs du XXIe siècle.

L'**énergie nucléaire** est principalement basée sur la fission nucléaire de l'uranium. Cependant, cet uranium n'est pas inépuisable et l'estimation de son épuisement se situe aux alentours d'un siècle ce qui en fait également une ressource non renouvelable (Figure 75). Cependant, si pour compenser la fin des réserves d'hydrocarbures, le nucléaire est privilégié au détriment des énergies renouvelables, il se peut que l'épuisement de l'uranium soit plus rapide.

²⁶ Source : <http://luniverssanslimite.e-monsite.com/pages/la-formation-des-combustibles-fossiles-annexe.html>

²⁷ Source <http://enjeux-planetaires.e-monsite.com/pages/les-articles/c-le-charbon-resultat-de-la-transformation-d'une-biomasse.html>

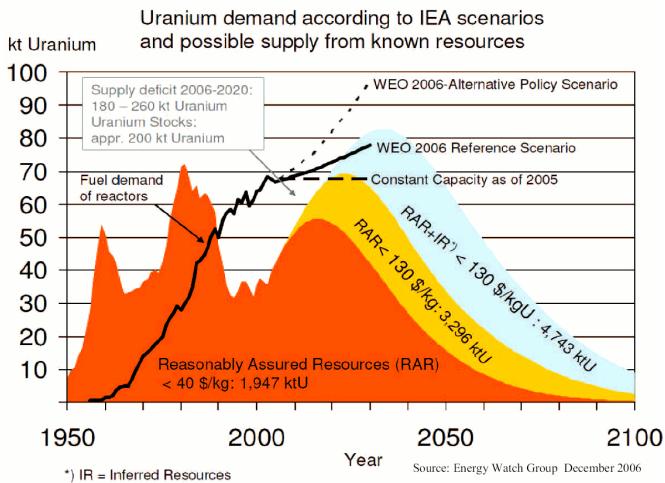


Figure 75 Évolution des ressources d'uranium dans le monde

L'uranium est naturellement présent sous forme de trois isotopes dans l'écorce terrestre, l'uranium 238, le plus stable et abondant (99,28%), l'uranium 235 (0,71%), utilisé pour la fission et des traces d'uranium 234. L'uranium 235 est donc utilisé dans les réacteurs nucléaires après avoir été enrichi afin de produire de l'électricité. Cette forme d'énergie est fortement répandue au Japon (avant Fukushima), en France, en Ukraine, en Russie et aux États-Unis notamment. L'obtention d'énergie à partir d'atomes peut se faire par fission ou par fusion (en développement). La fission du noyau d'un atome engendre la formation de nouveaux éléments, une importante quantité d'énergie produite ainsi que l'émission de neutrons (Figure 76). La masse des éléments formés par la fission est légèrement inférieure à la masse initiale ce qui explique, par l'équation $E=mc^2$, que la masse perdue est transformée en énergie. Ce processus peut être répété avec les nouveaux atomes formés afin de constamment produire de l'énergie. Cette fission peut être induite (par la capture d'un neutron) ou spontanée (par l'instabilité de l'isotope). (energie-nucleaire.net, 2014)

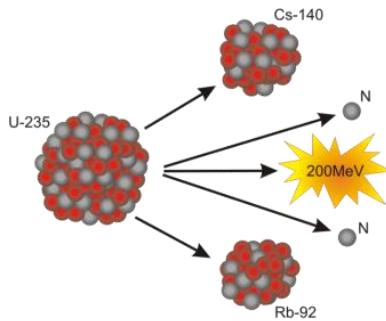


Figure 76 Fission nucléaire de l'uranium 235

L'énergie nucléaire est donc non renouvelable et les pays l'exploitant dépendent de l'approvisionnement des quelques pays qui ont les réserves d'uranium sur leur sol (moins de 10 pays représentent 98% de la production mondiale en 2016²⁸). En plus, de l'épuisement des

²⁸ Source : <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx>

ressources, l'énergie nucléaire a comme principal impact les déchets qu'elle engendre qui restent radioactifs pendant de nombreuses années.

b. Autres

Il est également possible de citer dans la catégorie des ressources non renouvelables, les **métaux**, qui sont des ressources abiotiques et qui, tout comme les combustibles fossiles, représentent un enjeu majeur de par leur épuisement envisagé à la vue de la consommation qui en est faite. Les minérais métalliques proviennent également de formations géologiques très anciennes, des roches composées de fer, cuivre, zinc, or par exemple qui ne sont pas localisés de manière équitable sur la planète. Ces éléments sont largement utilisés par notre société et leur surexploitation mène inévitablement à leur épuisement (Figure 77). Aujourd'hui il est donc important d'adopter une production durable pour réduire les besoins de ces métaux mais également accélérer la naissance de filières de recyclage et de réutilisation pour réduire la production à partir de matières primaires.

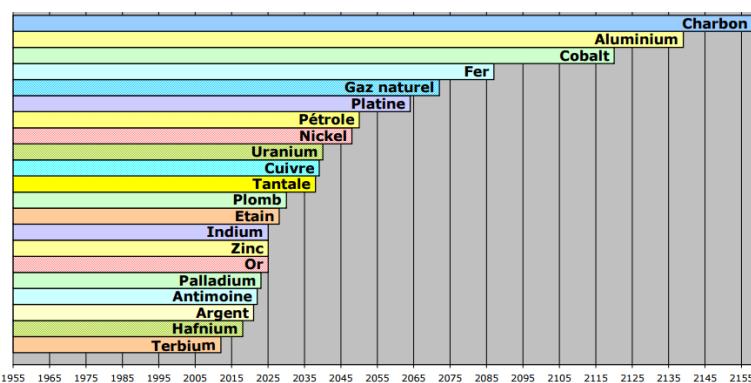


Figure 77 Années d'épuisement des richesses exploitables au rythme actuel de consommation²⁹

L'exploitation des ressources naturelles est une activité humaine courante, comme par exemple, la **pêche**. L'Homme a considérablement développé l'exploitation des ressources naturelles en activités industrielles comme l'extraction du pétrole, de minérais, la pêche ou l'exploitation du bois. Le problème est, par exemple, que la surpêche mène à la disparition de certaines espèces si les prises sont trop fréquentes et trop importantes par rapport au renouvellement de la population. Comme mentionné, une **ressource renouvelable** est une ressource naturelle dont le stock peut se reconstituer sur une période courte à l'échelle humaine. C'est le cas des ressources animales (élevage par exemple) ou végétales (forêts). Cependant, pour être tout à fait exact, il faut aussi que le stock puisse se renouveler aussi vite qu'il est consommé. Ainsi, un stock de poissons peut certes être renouvelable et pourtant être menacé d'extinction si la pêche est intensive et rend impossible toute reproduction du stock. Par exemple, La surpêche de la morue de l'Atlantique au large de la Terre Neuve a provoqué un effondrement des stocks en 1992, provoquant l'arrêt forcé de la pêche. Les stocks ne se régénèreront peut-être pas même si la pêche est réduite significativement ou complètement. (Figure 78)

²⁹ Source : <https://www.terresacree.org/ressources.htm>

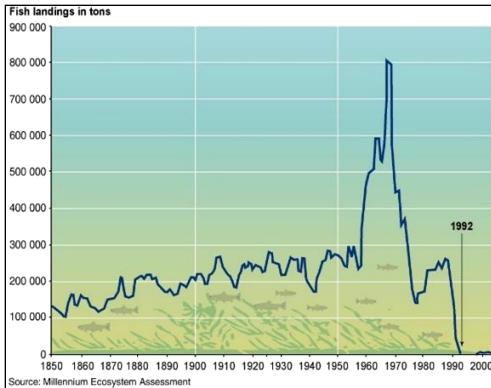


Figure 78 Évolution de la population de la morue dans l'Atlantique du Nord

Le pétrole, le gaz et les minéraux sont souvent évoqués comme des ressources non renouvelables. Mais, dans certains cas, l'eau est puisée de nappes dont le cycle de renouvellement excède le temps d'une vie humaine, donc il s'agit d'eau fossile, qui est une ressource épuisable. En 2015, 4 milliards de m³ d'eau naturelle auraient été consommés ce qui est supérieur aux capacités de renouvellement des réserves mondiales (Boucher, 2016). Il est également estimé que l'Homme utilise chaque année 1,6 planète ce qui signifie qu'il utilise 1,6 fois plus de ressources que ce que la Terre peut lui fournir. D'année en année cette valeur augmente et il est estimé qu'à ce rythme, en 2030, deux planètes seront nécessaires (Picard, 2015).

Aujourd'hui, l'utilisation des ressources non renouvelables préoccupe de plus en plus de personnes. La durée d'utilisation de ces ressources ne peut être allongée qu'en réduisant leur consommation. Cette réduction passe notamment par la simplicité volontaire, où l'individu réduit volontairement sa consommation en se concentrant sur les valeurs essentielles et non sur les possessions matérielles³⁰, une utilisation plus durable et plus efficace de la ressource (améliorations techniques et économiques) soit par le développement de moyens de réutilisation, de recyclage ou de valorisation énergétique, etc. Le jeu du marché peut aussi réguler la demande, la raréfaction d'une ressource entraînant mécaniquement une hausse des prix, qui elle-même se traduit par une baisse de la demande et, dans le même temps, rend compétitives d'autres solutions techniques. Les autres solutions techniques utilisent notamment des substituts. Le pétrole peut ainsi être remplacé par du diester, carburant produit à partir de l'huile de colza. Toutefois, la production de diester peut engendrer d'autres impacts qu'il faut considérer (utilisation du territoire, activités agricoles, etc.). Lorsque l'amélioration technique est une véritable mutation, le besoin d'un substitut peut même disparaître. Par exemple, en téléphonie, les fils de cuivre (matière coûteuse) sont remplacés par de la fibre de verre, puis par rien pour la téléphonie mobile, qui fonctionne par onde radio.

Conclusion : À travers l'évaluation de tous ces impacts, l'analyse du cycle de vie permet d'identifier les éléments contributeurs aux impacts environnementaux et ainsi par l'analyse des différentes options possibles sur ce large panel et sur tout le cycle de vie, le transfert de problème d'un impact à l'autre ou d'une phase du cycle de vie à l'autre peut être évité.

³⁰ Pour plus de détails, consulter <http://simplicitevolontaire.org/la-simplicite-volontaire/ou-commence/>

BIBLIOGRAPHIE

- Academic (2016) *Écotoxicologie*. Available at: http://fr.academic.ru/dic.nsf/frwiki/562366#Objectifs_de_1.27.C3.A9cotoxicologie (Accessed: 27 April 2017).
- Baird, C. and Cann, M. (2016) *Chimie de l'environnement*. 5ème. Edited by D. B. Supérieur.
- Berruyer, O. (2012) *Le trou de la couche d'ozone*. Available at: <https://www.les-crises.fr/le-trou-de-la-couche-d-ozone/> (Accessed: 26 April 2017).
- Boucher, J.-M. (2016) *Une année de consommation sur la planète : des chiffres vertigineux*. Available at: <http://www.consoglobe.com/24-heures-consommation-mondiale-cg> (Accessed: 27 April 2017).
- CCME (2012) *Standards panacadiens relatifs aux particules et à l'ozone*. Available at: http://www.ccme.ca/files/Resources/fr_air/fr_pmozone/PN_1527_2012_CWS_for_PM_and_Ozone_Final_Report-Fr.pdf (Accessed: 27 April 2017).
- Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail (2017) *Qu'est-ce que DL50 et CL50?* Available at: <http://www.cchst.ca/oshanswers/chemicals/lد50.html> (Accessed: 27 April 2017).
- CITEPA (2017) *Changement climatique et effet de serre, 2017*. Available at: <https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/phenomenes/changement-climatique-effet-de-serre> (Accessed: 25 April 2017).
- Delmas, R. *et al.* (2010) *Les pluies acides*. Available at: <http://omer7.sedoo.fr/mallette/fiches/Pollution-de-l-eau-et-des-sols> (Accessed: 26 April 2017).
- Drouin, L. (2003) *Transport, environnement et santé, un lien indissociable*.
- Dupont, J. (2004) *La problématique des lacs acides au Québec*. Available at: http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/EAU/eco_aqua/lacs_acides/2004/lacs-acides-Qc.pdf (Accessed: 26 April 2017).
- energie-nucleaire.net (2014) *La fission nucléaire*. Available at: <https://energie-nucleaire.net/qu-est-ce-que-l-energie-nucleaire/fission-nucleaire> (Accessed: 27 April 2017).
- Environnement Canada (2012) *Évaluation scientifique canadienne du smog*. Available at: <https://www.ec.gc.ca/Publications/AD024B6B-A18B-408D-ACA2-59B1B4E04863/EvaluationScientifiqueCanadienneDuSmogFaitsSaillantsEtMessagesCles.pdf> (Accessed: 27 April 2017).
- Environnement Canada (2013) *Appauvrissement de la couche d'ozone et ses impacts*. Available at: <https://www.ec.gc.ca/ozone/default.asp?lang=Fr&n=6798FAB0-1> (Accessed: 26 April 2017).
- Environnement Canada (2015) *La science des changements climatiques*. Available at: <https://ec.gc.ca/scs/default.asp?lang=Fr&n=A5F83C26-1> (Accessed: 25 April 2017).
- EPA (2014) *Good Up High Bad Nearby - What is Ozone?* Available at: <https://cfpub.epa.gov/airnow/index.cfm?action=gooduphigh.index> (Accessed: 27 April 2017).
- Éric Denoux (2010) *Circulation thermohaline — Acces, 2010*. Available at: <http://acces.ens->

lyon.fr/acces/terre/paleo/systemclim/gulf-stream/pages_gulfstream/dosscientif/descriptgulfstream/circuthermohal/circuthermohalhtm (Accessed: 25 April 2017).

Gouvernement du Canada (2014) *Le smog et votre santé*. Available at: <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/qualite-air/smog-et-votre-sante.html> (Accessed: 27 April 2017).

Green, W. (2014) *Photochemical Smog*. Available at: <http://www.mrgscience.com/ess-topic-63-photochemical-smog.html> (Accessed: 27 April 2017).

IPCC (2013) *Fifth Assessment Report*. doi: 10.1017/CBO9781107415324.Summary.

IPCC (2022) Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-33, doi:10.1017/9781009325844.001.

ISO (2006a) *ISO 14040 : Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre*.

ISO (2006b) *ISO 14044 : Management environnemental - Exigences et lignes directrices*.

Jolliet, O.; Saadé, M.; Crettaz, P.; Shaked, S. (2017) *Analyse du cycle de vie: comprendre et réaliser un écobilan*. 3e édition. Edited by P. polytechniques et universitaires Romandes. Lausanne, Suisse: Presses polytechniques et universitaires romandes.

Lautier, A. et al. (2010) ‘Development of normalization factors for Canada and the United States and comparison with European factors’, *Science of the Total Environment*, 409(1), pp. 33–42. doi: 10.1016/j.scitotenv.2010.09.016.

Myhre, G. et al. (2013) *2013: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. doi: 10.1017/CBO9781107415324.018.

OMM (2015) *Un trou d'ozone étendu observé au-dessus de l'Antarctique*. Available at: <https://public.wmo.int/fr/medias/nouvelles/un-trou-dozone-etendu-observee-au-dessus-de-lantarctique> (Accessed: 26 April 2017).

OMM (2016) ‘La teneur moyenne de l’atmosphère en CO₂ a atteint 400 parties par million en 2015’, 24 October. Available at: <https://public.wmo.int/fr/medias/communiques-de-presse/la-teneur-moyenne-de-l-atmosphere-en-co2-atteint-400-parties-par-million>.

OMS (2005) *Lignes directrices relatives à la qualité de l'air : particules, ozone, dioxyde d'azote et dioxyde de soufre*. Available at: http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/mine_apatite_lac-a-paul/documents/DB40.pdf (Accessed: 27 April 2017).

Paradis, J. (2011) *Inventaire des émissions des principaux contaminants atmosphériques au Québec en*

- 2008 et évolution depuis 1990. Available at: <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/air/inventaire/rapport2008.pdf> (Accessed: 27 April 2017).
- Phenomer (2013) *Qu'est-ce que le phytoplancton?*, 2013. Available at: <http://www.phenomer.org/Mieux-connaître-les-microalgues/Qu-est-ce-que-le-phytoplancton> (Accessed: 25 April 2017).
- Picard, N. (2015) *Depuis cette nuit, la Terre vit sur ses réserves.* Available at: http://www.lemonde.fr/planete/article/2015/08/13/a-partir-de-ce-soir-la-terre-vit-sur-ses-reserves_4722826_3244.html (Accessed: 27 April 2017).
- Pidwirny, M. and Jones, S. (2009) *Acid Precipitation.* Available at: <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/8h.html> (Accessed: 26 April 2017).
- Réseau Canopé (no date) *Effets des pluies acides.* Available at: <http://www.crdp-montpellier.fr/ressources/99/99en0771.html> (Accessed: 26 April 2017).
- RSQA - Ville de Montréal (2017) *Info-smog.* Available at: http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=7237,74765635&_dad=portal&_schema=PORTAL (Accessed: 27 April 2017).
- Sacco, L. (2016) *Le trou de la couche d'ozone est bien en train de disparaître.* Available at: <http://www.futura-sciences.com/planete/actualites/pollution-trou-couche-ozone-bien-train-disparaitre-63386/> (Accessed: 26 April 2017).
- Smith, G. G. et al. (2007) *Les combustibles fossiles.* Available at: http://www.gac.ca/wp/wp-content/uploads/2015/02/FossilFuels_f.pdf (Accessed: 27 April 2017).
- UVED (2017) *Développement durable et impacts environnementaux.* Available at: http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap01/co/ch01_010_acv_3.html (Accessed: 25 April 2017).
- Vitousek, P. M. et al. (1997) 'Human Domination of Earth's Ecosystems', *Science, New Series*, 277(5325), pp. 494–499. Available at: <http://links.jstor.org/sici?doi=0036-8075%2819970725%293%3A277%3A5325%3C494%3AHDOEE%3E2.0.CO%3B2-2> (Accessed: 27 April 2017).
- Walker, C. H. et al. (2012) *Principles of Ecotoxicology.* 4th edn. CRC Press.
- Welch Charles (no date) *The Ozone Hole.* Available at: <http://www.theozonehole.com/odcs.htm> (Accessed: 26 April 2017).
- World Resources Institute (no date) *Sources of Eutrophication.* Available at: <http://www.wri.org/our-work/project/eutrophication-and-hypoxia/sources-eutrophication> (Accessed: 27 April 2017).