

MANUEL

DE FORMATION

- GESTION DE L'ENVIRONNEMENT -

GESTION DURABLE DE L'AIR



COLEACP

Ce manuel de formation a été conçu et réalisé par les services Formation et Information & Communication du COLEACP.

La présente publication a été élaborée par le COLEACP dans le cadre de ses programmes Fit For Market, Fit for Market SPS et STDF, financés par l'Union européenne (Fonds européen de développement – FED), l'Agence Française de Développement (AFD) et Le Fonds pour l'application des normes et le développement du commerce (STDF)

Le contenu de la présente publication relève de la seule responsabilité du COLEACP et ne peut aucunement être considéré comme reflétant le point de vue officiel de l'Union européenne, de l'AFD et du STDF.

Le COLEACP détient la propriété intellectuelle de l'ensemble du document.

Cette publication fait partie intégrante d'une collection COLEACP, composée d'outils de formation, de supports pédagogiques et de documents techniques. Tous sont adaptés aux différents types de bénéficiaires et niveaux de qualification rencontrés dans les filières de production et de commercialisation agricoles.

Cette collection est disponible en ligne pour les membres du COLEACP.

L'utilisation de tout ou partie de la publication est possible dans le cadre de partenariats ciblés et selon certaines modalités. Pour cela, contacter le Coleacp à network@coleacp.org.



GESTION DURABLE DE L'AIR

Chapitre 1: Fondements sur la qualité de l'air 1

- Introduction
- Composition et qualité de l'air
- Les impacts de la pollution atmosphérique : principaux faits
- Nature et effets sur la santé des polluants atmosphériques
- Nature et effets sur l'environnement des polluants atmosphériques
- Donner un cadre à la gestion de la qualité de l'air
- Annexe : Techniques de mesure de la qualité de l'air

Chapitre 2: Impacts des pratiques culturales sur la qualité de l'air 29

- Influence des pratiques agricoles sur la qualité de l'air
- Pollution atmosphérique par les matières fertilisantes
- Pollution atmosphérique par les produits phytopharmaceutiques

Chapitre 3: Les gaz à effet de serre et le bilan carbone 57

- Les gaz à effet de serre (GES) et le climat
- Les principaux accords internationaux relatifs aux GES
- Les cycles de carbone et de l'azote
- Les sources principales de GES dans le secteur de l'agriculture
- Les différentes méthodes de calcul de GES dans le secteur de l'agriculture

Chapitre 4: Impacts des pratiques agricoles sur la qualité de l'air et stratégies d'atténuation 87

- Pratiques agricoles et émissions de GES
- Possibilités d'atténuation et de compensation des émissions
- Nécessité d'évaluations holistiques et d'une approche systémique

Chapitre 5: Étude de cas.....117

- Une étude de cas – Pourquoi ? Comment ?
- Partie 1 : Mise en situation
- Partie 2 : Analyse du scénario
- Partie 3 : Recherche de solutions appropriées
- Partie 4 : Plan d'action proposé

Abréviations et acronymes les plus utilisés.....151

Références bibliographiques153

Sites Web utiles163



Chapitre 1

Fondements sur la qualité de l'air

Introduction	2
Composition et qualité de l'air	4
Les impacts de la pollution atmosphérique : principaux faits.....	8
Nature et effets sur la santé des polluants atmosphériques	10
Nature et effets sur l'environnement des polluants atmosphériques	15
Donner un cadre à la gestion de la qualité de l'air	21
Annexe : Techniques de mesure de la qualité de l'air	27

Objectifs pédagogiques

À l'issue de ce chapitre, l'apprenant sera capable :

- De connaître la définition de la pollution de l'air
- D'identifier la nature des principaux polluants de l'air
- De comprendre quels sont les enjeux de la pollution de l'air
- De connaître la composition de l'atmosphère et ses différentes couches
- De comprendre les impacts de la pollution de l'air sur la santé, l'environnement et l'agriculture
- De connaître le rôle des grands accords internationaux et le cadre juridique sur la qualité de l'air, les rejets et les valeurs limites

1. INTRODUCTION



Selon l'OMS¹, par pollution de l'air, on entend « la contamination de l'environnement intérieur ou extérieur par un agent chimique, physique ou biologique qui modifie les caractéristiques naturelles de l'atmosphère ». Les agents polluants en jeu sont des gaz ou des particules dont les sources sont naturelles (ex. : feux de forêt) ou anthropiques. Les principales causes de la pollution de l'air sont en relation avec l'ignition de combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz) utilisés par l'homme. Le transport routier, les industries, le secteur résidentiel, mais aussi l'agriculture sont parmi les principales activités humaines contributrices à la pollution de l'air. L'agriculture n'échappe pas à une part de responsabilité dans la présence de gaz à effet de serre et de particules fines dans l'atmosphère. Mais, par ailleurs, la pollution de l'air ambiant impacte à son tour l'agriculture et la qualité sanitaire des produits (présence, via les retombées atmosphériques sur les plantes et sur les sols, de composés toxiques comme les métaux lourds, les dioxines, les composés aromatiques polycycliques ou HAP).

La pollution de l'air que nous respirons est aujourd'hui une préoccupation sociétale de tout premier plan. Elle a des impacts sanitaires et environnementaux et, en conséquence,

1 Pour des informations complètes, consulter le site de l'OMS : [www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](http://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).

des répercussions économiques importantes. L'exposition aux matières particulaires (PM) et à différents gaz, affecte la santé humaine. Les polluants les plus nocifs pour la santé publique sont notamment, le monoxyde de carbone (CO), l'ozone (O_3), le dioxyde d'azote (NO_2) et le dioxyde de soufre (SO_2), les polluants organiques persistants (POPs) et les « pesticides » présents dans l'air. La pollution de l'air a des effets multiples sur la santé, car les polluants qui sont responsables de cette pollution sont également très variés, mais selon l'OMS « la pollution de l'air à l'extérieur comme à l'intérieur entraîne entre autres des maladies respiratoires qui peuvent être mortelles ». Par ailleurs, elle altère le bon état écologique des écosystèmes naturels et la production des systèmes agricoles et sylvicoles.

Émissions, transport, transformation, dépôts : la pollution de l'air est le résultat d'un ensemble de phénomènes complexes. L'évaluation qualitative et quantitative de la contribution de chacune de ces sources aux concentrations observées dans l'air et de leurs voies de réduction est indispensable pour élaborer des politiques et des recommandations en matière de gestion de la qualité de l'air.

Dans le secteur agricole, au même titre que dans les autres secteurs d'activité, les différents acteurs doivent développer des solutions réalistes pour limiter les émissions et les impacts de la contamination de l'air... et les appliquer dès à présent. Pour y arriver, il est également nécessaire de partager entre acteurs les connaissances sur l'atmosphère (sa composition, ses mécanismes de régulation), sur la pollution de l'air (nature, concentrations, effets) et sur les sources d'émission des polluants, depuis l'échelle locale jusqu'à l'internationale, pour mettre en œuvre des solutions adaptées aux conditions économiques locales et à chaque échelle (depuis l'exploitation agricole jusqu'à l'État et les conventions internationales).

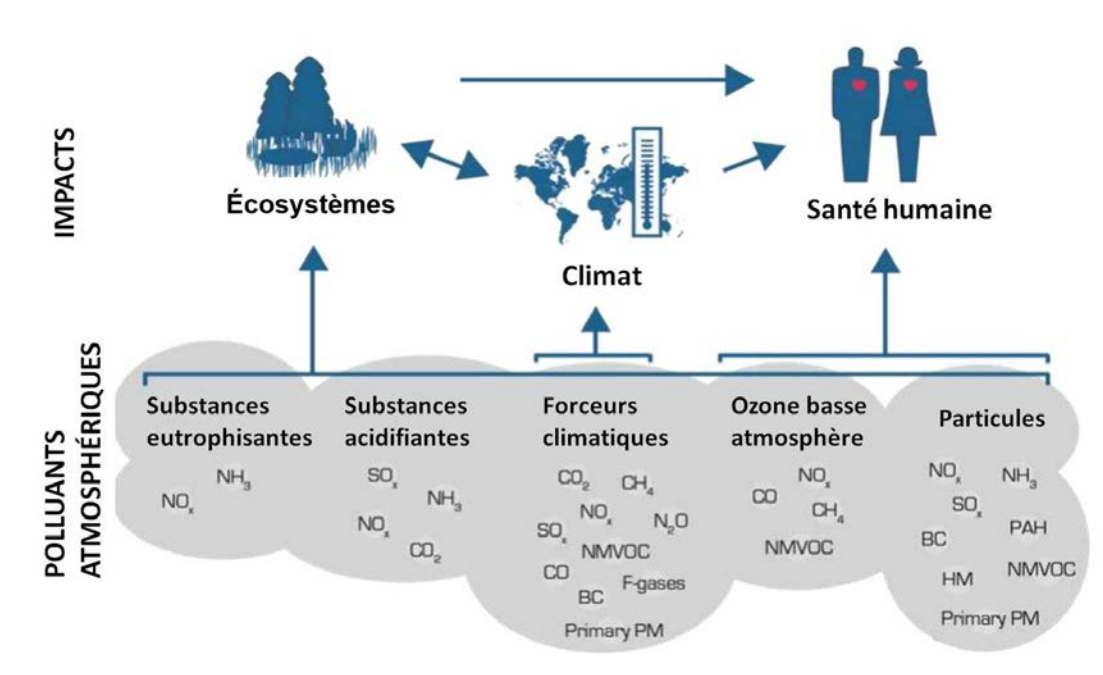


Figure 1 – Polluants atmosphériques et impacts observés

2. COMPOSITION ET QUALITÉ DE L'AIR

Pour mieux comprendre le rôle de l'agriculture dans les émissions de polluants atmosphériques comment les **intrants agricoles** (matières fertilisantes et produits phytopharmaceutiques) peuvent agir en tant que polluants atmosphériques, il nous faut reparler d'abord brièvement des différentes couches de l'atmosphère, ce qui permettra de cerner les déterminants de la dispersion de ces polluants dans l'atmosphère, et ensuite aborder les formes que peuvent prendre les polluants atmosphériques.

2.1. Structure et composition de l'atmosphère

L'atmosphère, enveloppe gazeuse d'environ 700 km d'épaisseur, est maintenue par gravité autour du globe terrestre en rotation. Sa pression diminue avec l'altitude (divisée par cent à 30 km d'altitude et par un million à 100 km). On y observe également une distribution verticale de la température.

L'atmosphère peut être schématiquement découpée en **4 zones** selon l'altitude :

- la troposphère (couche la plus basse, 8 à 16 km d'altitude)
- la stratosphère (jusqu'à 48 km d'altitude)
- la mésosphère (jusqu'à 80 km d'altitude)
- la thermosphère (couche la plus haute, jusqu'à 700 km).

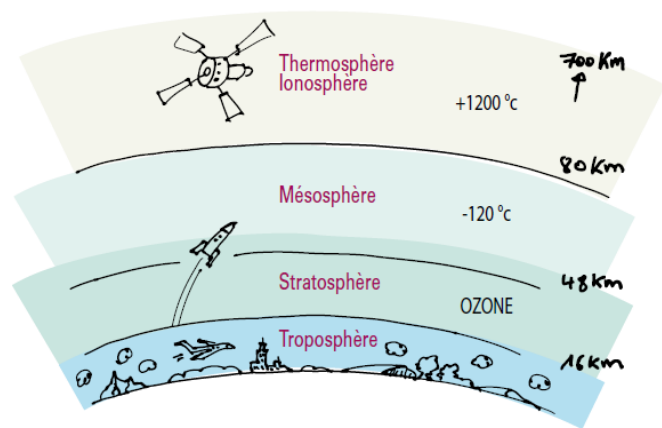


Figure 2 – Stratification verticale de l'atmosphère

La matière atmosphérique se présente sous forme gazeuse et condensée (eau liquide, neige, aérosols, etc.). Les proportions d'azote, d'oxygène et d'argon sont constantes dans toute l'atmosphère, tandis que les proportions d'eau, de gaz carbonique, de dioxyde de soufre et d'ozone varient avec l'altitude. La **troposphère** contient jusqu'à 80 % de la masse de l'atmosphère et la température de l'air y décroît de 6,5 °C par kilomètre. Elle se compose principalement d'azote (78 %), d'oxygène (21 %) et de la quasi-totalité de la vapeur d'eau. Dans la stratosphère, la température est d'abord constante, puis elle croît avec l'altitude du fait de l'absorption du rayonnement UV solaire par l'ozone (O_3) et le dioxygène moléculaire (O_2). Une telle augmentation de la température empêche beaucoup la convection de l'air. Par conséquent, la plupart des phénomènes climatiques (nuages porteurs d'orages, cumulonimbus, etc.) sont confinés à la troposphère. De façon générale, **le climat terrestre** dépend étroitement des effets qui existent entre la chaleur du Soleil et l'ensemble de l'atmosphère. La **météorologie et la climatologie** s'intéressent plus spécialement aux événements qui se produisent dans la couche la plus basse, la troposphère.

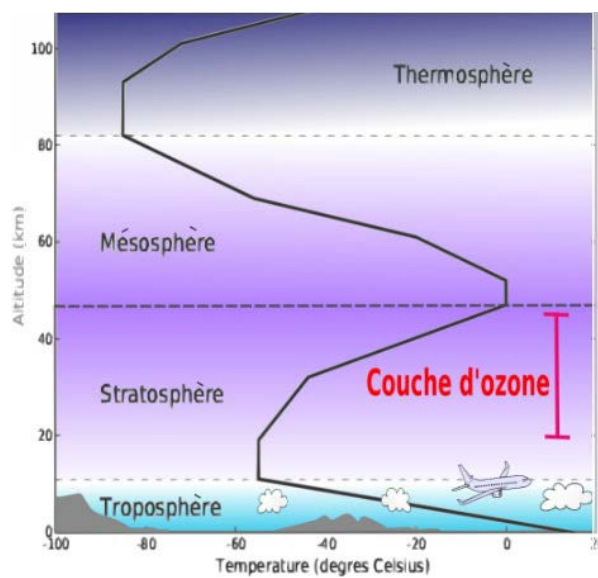


Figure 3 – Variation de la température dans les couches de l'atmosphère

La troposphère est donc la couche la plus troublée. Elle est agitée sans cesse de mouvements verticaux et horizontaux. La turbulence verticale est due au voisinage de la surface du globe, qui détermine d'une part des ascendances mécaniques (par frottement des masses d'air sur les obstacles présents à la surface du sol terrestre) et d'autre part des ascendances thermiques (courants d'air, par instabilité et thermoconvection). Ce sont ces phénomènes qui entrent en jeu pour expliquer comment les polluants (comme des pesticides pulvérisés dans une parcelle de culture) peuvent se disperser verticalement dans l'atmosphère, puis voyager sur de longues distances !

La couche de l'atmosphère qui nous importe le plus est la partie de la troposphère s'étendant jusqu'à 1 km d'altitude en moyenne, appelée « couche limite atmosphérique (CLA) ». Elle est directement soumise à l'influence de la surface terrestre (terres, mers, lacs, etc.), à l'échelle de la journée.

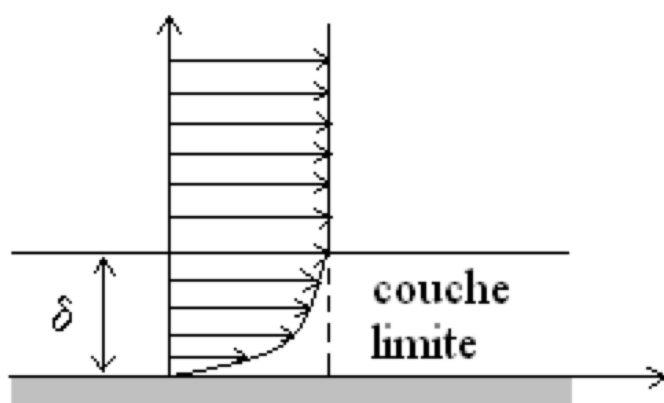


Figure 4 – Couche limite atmosphérique (CLA): rugosité et profils de vitesse verticaux (à une certaine hauteur, la vitesse du vent n'est plus influencée par la rugosité de la Terre). Dans la CLA les effets de la surface se font sentir en moins d'une heure.

La CLA est caractérisée par des transferts d'énergie entre la surface et l'atmosphère (frottement de l'air sur le sol, présence d'obstacles). Son étude est essentielle pour la compréhension des épisodes de pollution, car les polluants émis au sol seront mélangés et dilués dans la CLA. La « rugosité » décrit les effets dynamiques dus aux irrégularités de surface (montagnes, bâtiments, haies, etc.).

2.2. Mélange des polluants dans l'atmosphère et vitesse de diffusion

La concentration d'un polluant atmosphérique dépend non seulement des mécanismes de diffusion et de transport vertical et horizontal au sein de l'atmosphère (la turbulence), mais aussi de la durée de vie du polluant. Par exemple, un pesticide peut se dégrader (ex. : effet de la lumière appelé « photolyse ») ou finir par se déposer au sol.

La diffusion dépend de la turbulence atmosphérique. Il existe deux échelles de turbulence :

- à **petite échelle**, les instabilités sont influencées par les échanges mécaniques (dus à la rugosité de la surface terrestre) et thermiques, entre le sol et l'air, dans la couche limite atmosphérique ;
- à **grande échelle**, les instabilités sont liées aux conditions météorologiques à l'échelle planétaire.

La turbulence est liée à la stabilité de l'atmosphère. En effet, la stabilité de l'air dépend de l'évolution de la **température de l'air avec l'altitude**, de la **turbulence thermique** et de la **turbulence mécanique**.

- **Lorsque l'atmosphère est instable**, l'air est plus chaud au voisinage du sol qu'en altitude. Dans ce cas, les conditions sont favorables à un déplacement vertical de l'air : la turbulence est très importante et la dispersion est favorisée. Les polluants, tels que les pesticides pulvérisés, vont donc **avoir tendance à s'élever**. Ce phénomène se produit notamment pendant la journée, lorsque la température de l'air décroît rapidement en fonction de la hauteur.
- **Lorsque l'atmosphère est stable**, l'air est plus froid au voisinage du sol qu'en altitude. C'est ce qu'on appelle le phénomène d'inversion de température, qui peut être partiel ou total. Dans ce cas, la turbulence verticale est plutôt faible et les polluants vont donc **avoir tendance à rester au niveau du sol**. Ce phénomène se produit dans certaines conditions, par exemple, la nuit, lorsque la température augmente avec l'altitude.

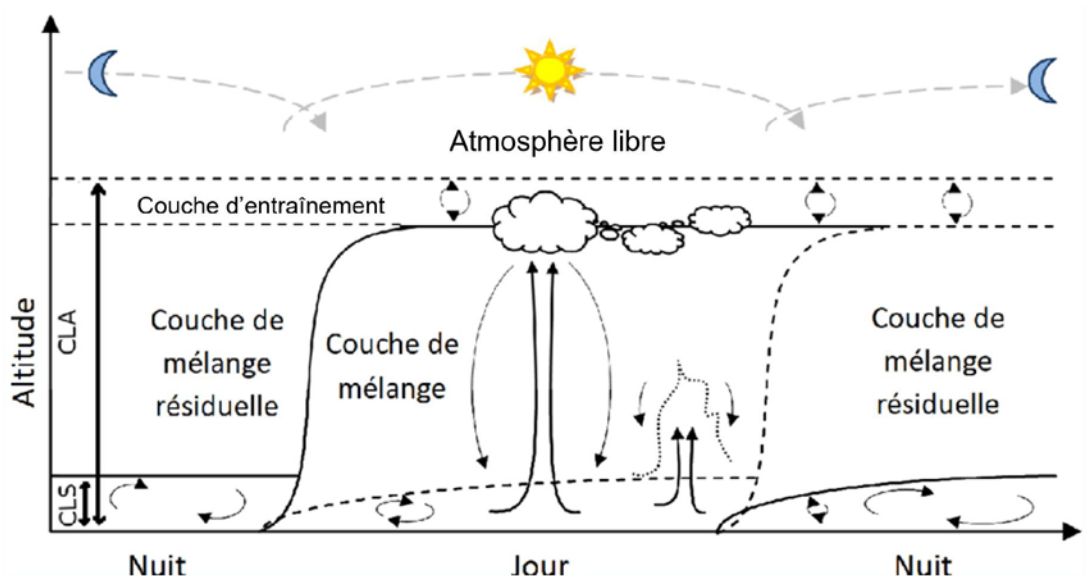


Figure 5 – Cycle de la couche limite atmosphérique (CLA) sur 24 heures.

Lorsque l'air environnant et le polluant sont à la même température, le polluant n'est soumis à aucune force.

Tableau 1 – Temps caractéristique du transport atmosphérique d'un polluant de l'atmosphère

Transport	Temps caractéristique pour la diffusion
Dans la CLA	1 heure à 1 journée
Dans la troposphère	1 semaine à 1 mois
De la troposphère à la stratosphère	5 à 10 ans
Continental	1 semaine
Intercontinental	2 semaines
Inter-hémisphère	1 année

3. LES IMPACTS DE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE : PRINCIPAUX FAITS

La source la moins contestable quant aux effets de la pollution atmosphérique est certainement l'OMS, qui énonce les faits suivant sur son site Web.

- **La pollution de l'air représente un risque environnemental majeur pour la santé.** En diminuant les niveaux de pollution atmosphérique, les pays peuvent réduire la charge de morbidité imputable aux accidents vasculaires cérébraux, aux cardiopathies, au cancer du poumon et aux affections respiratoires, chroniques ou aiguës, y compris l'asthme.
- La santé cardiovasculaire et respiratoire de la population, à court et long termes, est inversement proportionnelle au niveau de la pollution atmosphérique. On dispose de plus en plus de faits démontrant les liens entre la pollution de l'air ambiant et le risque cardiovasculaire, dont des études dans des zones très polluées.
- Les lignes directrices de l'OMS relatives à la qualité de l'air évaluent les effets de la pollution atmosphérique sur la santé et donnent des valeurs seuils au-delà desquelles elle lui est nuisible.
- En 2016, **91 % de la population mondiale vivaient dans des endroits où les lignes directrices de l'OMS relatives à la qualité de l'air n'étaient pas respectées.**
- En 2016, on estimait à **4,2 millions le nombre de décès prématurés** provoqués dans le monde par la pollution ambiante (de l'air extérieur) dans les zones urbaines, périurbaines et rurales. Cette mortalité est due à l'exposition aux particules d'un diamètre de 2,5 microns ou moins (PM2.5), qui provoquent des maladies cardiovasculaires et respiratoires, et des cancers.
- Quelque **91 % de ces décès prématurés sont survenus dans des pays à revenu faible** ou intermédiaire, la plus grande part étant enregistrée dans les régions OMS de l'Asie du Sud-Est et du Pacifique occidental.
- Il serait possible de limiter certaines des principales sources de pollution atmosphérique urbaine en menant des politiques et en investissant en faveur de transports plus écologiques, mais aussi de logements, de production d'électricité et d'industries à haut rendement énergétique, et enfin d'une gestion des déchets optimisée dans les municipalités.
- Outre la pollution de l'air extérieur, **la fumée domestique représente un grave risque sanitaire** pour environ 3 milliards de personnes qui font cuire leurs aliments, chauffent et éclairent leur logement à l'aide de combustibles à base de biomasse, de mazout et de charbon.

Selon les estimations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), l'insalubrité de l'air a causé la mort de près de 7 millions de personnes en 2012 (une personne sur huit au niveau mondial). Si les pays à revenu faible ou intermédiaire subissent les pertes humaines les plus importantes², les pays industrialisés supportent néanmoins une charge de morbidité significative. En Europe pour la même année, on comptait en moyenne 600 000 décès.

2 Les pays à revenu faible ou intermédiaire (plus particulièrement les régions d'Asie du Sud-Est et du Pacifique occidental) représentent 88 % des décès prématurés sur 7 millions causés par la pollution atmosphérique en 2012.

Tableau 2 – Répartition des principales causes de mortalité liées à l'insalubrité de l'air à l'échelle du globe en 2012 (Source : OMS, 2012)

Affections dues à la pollution atmosphérique	% (sur 7 millions de décès prématurés)
Accident vasculaire cérébral (AVC)	34
Cancer des poumons	36
Maladie cardiaque	27

L'OMS estime qu'environ 58 % des décès prématurés liés à la pollution de l'air extérieur résultaient en 2016 de cardiopathies ischémiques et d'accidents vasculaires cérébraux, 18 % de bronchopneumopathies chroniques obstructives ou d'infections aiguës des voies respiratoires inférieures, tandis que les 6 % restants sont imputables au cancer du poumon. Les conclusions d'une évaluation menée en 2013 par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) de l'OMS ont montré que la pollution de l'air extérieur était carcinogène, les matières particulaires étant le polluant associé le plus étroitement à une incidence accrue de cancers, en particulier du poumon. Un lien a également été établi entre la pollution atmosphérique et l'augmentation du nombre de cancers des voies urinaires/de la vessie.

Pour un pays comme la France, le coût sanitaire annuel de la pollution de l'air extérieur supporté par la collectivité est estimé entre 20 à 30 milliards d'euros (rapport CGDD, 2013), ce qui représente 1,4 à 2,1 % du PIB national. Ce coût est d'un ordre de grandeur comparable au coût sanitaire du tabac. En Europe, 2/3 des sites protégés du réseau européen Natura 2000 sont affectés dans leur biodiversité par les dépôts de polluants atmosphériques (Commission européenne, 2013).

4. NATURE ET EFFETS SUR LA SANTÉ DES POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUES³

4.1. Les matières particulaires

4.1.1. Définition et principales sources

Les « **matières particulaires** » sont classées en fonction de leur diamètre et leur source émettrice. Elles sont formées d'un **mélange complexe de particules solides et liquides** de substances **organiques et minérales** en suspension dans l'air. Elles se composent en général (en plus de l'eau) :

- de carbone élémentaire (ex. : carbone suie provenant des combustibles automobiles) ;
- d'une fraction minérale (**éléments issus de l'érosion des sols, sulfates, nitrates, ammoniacque**, chlorure de sodium, matières minérales : plomb, zinc, etc.) ;
- de matières organiques (tels que les COV ou **composés organiques volatils** – notamment ceux résultant des fongicides, herbicides, insecticides, etc., utilisés dans les cultures –, grains de pollen, hydrocarbures, cétones, spores de champignon, etc.).

Les matières particulières sont un **indicateur indirect** courant de la pollution de l'air. **Elles affectent plus de personnes que n'importe quel autre polluant.**

Les particules **les plus grosses** sont regroupées sous l'appellation « **poussières** ». Les particules les plus grossières sont riches en fractions minérales issues de processus mécaniques (particules terrigènes générées par l'érosion, sels de mer, etc.).

Les particules dont la taille est **inférieure à 100 micromètres** (de 10^{-9} à 10^{-6} m) sont appelées, soit « **aérosols** » (ex. : gouttelettes < 100 μ m émises dans l'atmosphère lors de la pulvérisation des pesticides), soit, quand les particules sont encore plus petites, « **particules fines** » (ou PM). L'exposition chronique aux particules fines contribue au risque de développer des maladies cardiovasculaires, respiratoires et des cancers pulmonaires.

Si les particules d'un diamètre n'excédant pas 10 μ m (\leq PM10) peuvent pénétrer et se loger profondément à l'intérieur des poumons, **celles dont le diamètre est inférieur ou égal à 2,5 μ m (\leq PM2.5) sont encore plus nocives pour la santé.** Elles peuvent franchir la barrière pulmonaire et entrer dans la circulation sanguine. Pour des raisons de santé publique, les deux classes de particules fines font l'objet d'une **surveillance accrue** dans le cadre des études sur la **qualité de l'air**.

- Les **PM10** (*Particule Matter* < 10 μ m). Les mesures de la qualité de l'air sont généralement communiquées en teneur moyenne journalière ou annuelle de particules PM10 par mètre cube d'air. Les mesures en routine de la qualité de l'air expriment d'ordinaire les valeurs de concentration de ces particules en microgrammes par mètre cube (μ g/m³).
- Les **PM2.5** (*Particule Matter* < 2,5 μ m) qui contiennent plutôt de la matière organique et des espèces secondaires (ex. : nitrate d'ammonium, sulfates). La teneur de l'air en particules fines (PM2.5 ou inférieures) est également communiquée quand on dispose d'appareils de mesure suffisamment sensibles.

L'élevage et les grandes cultures sont générateurs de poussières et de particules fines (PM₁₀ et PM_{2.5}). Les émissions agricoles de ces contaminants primaires se répartissent entre les cultures **lors du travail du sol**, de la récolte et du **brûlage des résidus de récolte** et, pour l'élevage, au niveau essentiellement des bâtiments d'élevage. Ces émissions diffuses, bien que ponctuelles, **sont significatives** car elles ont lieu sur de grandes étendues.

Les particules qui se forment par abrasion ou qui sont mises en suspension dans l'air ont en général un diamètre supérieur à 1-2 µm (érosion éolienne, pollen...).

Les particules de grandeur moyenne (entre 0,1 et 1 µm) proviennent en majorité de sources secondaires et se forment par **conversion des gaz en particules à partir des précurseurs** SO₂, NO_x, NH₃ et des COV.



Figure 6 – Polluants atmosphériques primaires en agriculture (TSP = particules totales)

Ces dernières années, **les seuils de pollution ont été dépassés à plusieurs reprises dans les grandes villes européennes**. C'est l'accumulation en particules fines, composées en grande partie de nitrate d'ammonium et de sulfate d'ammonium, qui en est la cause. L'ammoniac, qui émane principalement de l'épandage intensif au printemps de **fertilisants agricoles azotés**, contribue significativement à la formation de ces particules qui peuvent perdurer dans l'atmosphère pendant plusieurs jours et ainsi être transportées sur de longues distances.

Les différents polluants agricoles mesurés pour l'indice de qualité de l'air sont :

- les espèces gazeuses liées à la pollution photochimique (l'ozone, les oxydes d'azote NO_x, les composés organiques volatils, etc.) ;
- les substances acidifiantes (le dioxyde de soufre SO₂, l'ammoniac NH₃, etc.) ;
- les polluants particulaires (PM_{2.5} et PM₁₀ de sulfate SO₄, d'ammonium NH₄⁺, de nitrates NO₃, etc.) ;
- les gaz à effet de serre comme le méthane CH₄, le protoxyde d'azote N₂O, le dioxyde de carbone CO₂.

4.1.2. Effets sur la santé des matières particulaires

Il existe un lien étroit et quantitatif entre l'exposition à des concentrations élevées en particules (PM10 et PM2.5), et un accroissement des taux de mortalité et de morbidité, au quotidien aussi bien qu'à plus long terme. De même, la mortalité liée à une telle exposition baisse à mesure que les concentrations en petites et fines particules sont réduites, en supposant que les autres facteurs restent inchangés. Un tel rapport permet aux décideurs de projeter dans quelle mesure réduire la pollution de l'air aux particules pourrait bénéficier à la santé de la population.

Même à faible concentration, la pollution aux petites particules a une incidence sanitaire ; en effet, **on n'a identifié aucun seuil au-dessous duquel elle n'affecte en rien la santé.** C'est pourquoi il était préconisé dans les lignes directrices OMS de 2005 d'œuvrer à **limiter au maximum** les niveaux de concentration en particules en suspension.

4.1.3. Valeurs limites

L'OMS, qui a établi une **corrélation claire** entre les concentrations de poussières fines et plusieurs effets sur la santé, principalement au niveau des maladies respiratoires et cardio-vasculaires, recommande les **valeurs indicatives** suivantes.

Tableau 3 – Valeurs indicatives OMS (site Web OMS, 2019)

PM10	20 µg/m³	Valeur limite indicative (directive) pour la moyenne annuelle
	50 µg/m³	Valeur limite indicative pour la moyenne journalière 99 ^e percentile (cette valeur ne peut être dépassée que 3 jours par an)
PM2.5	10 µg/m³	Valeur limite indicative (directive) pour la moyenne annuelle
	25 µg/m³	Valeur limite indicative pour la moyenne journalière 99 ^e percentile (cette valeur ne peut être dépassée que 3 jours par an)

Selon les lignes directrices de l'OMS relatives à la qualité de l'air, abaisser la concentration moyenne annuelle en particules fines PM2,5 de 35 µg/m³, un niveau communément enregistré dans nombre de villes en développement, à 10 µg/m³, soit le niveau préconisé par l'OMS, **pourrait réduire le taux de mortalité lié à la pollution de l'air d'environ 15 %.**

Des valeurs contraignantes sont également fixées au niveau de l'Union européenne par la directive concernant la qualité de l'air ambiant et l'air pur (directive 2008/50/CE).

Tableau 4 – Valeurs limites de la réglementation européenne sur la qualité de l'air

PM10	40 µg/m ³	Valeur limite pour la moyenne annuelle
	50 µg/m ³	Valeur limite indicative pour la moyenne journalière (cette valeur ne peut être dépassée plus de 35 jours par an)
PM2.5	25 µg/m ³	Valeur limite pour la moyenne annuelle pour 2015
	20 µg/m ³	Valeur limite pour la moyenne annuelle pour 2020

4.2. L'ozone (O₃)

4.2.1. Définition et principales sources

Il ne faut pas confondre l'ozone de la couche protectrice dans la haute atmosphère avec celui qui l'on retrouve au niveau du sol et qui est l'un des principaux constituants du smog photochimique. Dans ce cas, l'ozone se forme sous l'effet de réactions photochimiques (c'est-à-dire en présence du rayonnement solaire) entre divers polluants, comme les oxydes d'azote (NO_x) émis par les véhicules et l'industrie, et les composés organiques volatiles (COV), émis par les véhicules, les solvants et l'industrie. On observe des pics de concentration pendant les périodes de temps ensoleillé.

4.2.2. Effets sur la santé

À des concentrations trop élevées, l'ozone a des effets marqués sur la santé de l'homme. On observe alors des problèmes respiratoires, le déclenchement de crises d'asthme, une diminution de la fonction pulmonaire et l'apparition de maladies respiratoires.

4.2.3. Valeurs limites

100 µg/m³ moyenne sur 8 heures.

Sur la base de liens récemment établis entre la mortalité journalière et la concentration d'ozone dans l'air, la valeur seuil d'ozone préconisée dans les lignes directrices de l'OMS relatives à la qualité de l'air a été abaissée par rapport à celle des éditions précédentes qui s'élevait à 120 µg/m³.

4.3. Le dioxyde d'azote (NO₂)

4.3.1. Définition et principales sources

Dans l'air, le NO₂ a les effets suivants :

- à des concentrations dépassant 200 µg/m³, sur de courtes durées, c'est un gaz toxique entraînant une inflammation importante des voies respiratoires ;
- c'est le principal agent responsable de la formation des aérosols de nitrates, qui représentent une proportion importante des PM2.5 et d'ozone, en présence de rayons ultraviolets.

Les émissions anthropiques de NO₂ proviennent principalement de la combustion (chauffage, production d'électricité, moteurs des véhicules automobiles et des bateaux).

4.3.2. Effets sur la santé

Les études épidémiologiques ont montré que les symptômes bronchitiques chez l'enfant asthmatique augmentent avec une exposition de longue durée au NO_2 . On associe également une diminution de la fonction pulmonaire aux concentrations actuellement mesurées (ou observées) dans les villes d'Europe et d'Amérique du Nord.

4.3.3. Valeurs limites

40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ moyenne annuelle

200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ moyenne horaire

La valeur guide actuelle de l'OMS de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (moyenne annuelle), a été fixée pour protéger le public des effets du NO_2 gazeux sur la santé.

4.4. Le dioxyde de soufre (SO_2)

4.4.1. Définition et principales sources

Le SO_2 est un gaz incolore, d'odeur piquante. Il est produit par la combustion des énergies fossiles (charbon et pétrole) et la fonte des minerais de fer contenant du soufre. La source anthropique principale de SO_2 est la combustion des énergies fossiles contenant du soufre pour le chauffage domestique, la production d'électricité ou les véhicules à moteur.

4.4.2. Effets sur la santé

Le SO_2 affecte le système respiratoire, le fonctionnement des poumons et il provoque des irritations oculaires. L'inflammation de l'appareil respiratoire entraîne de la toux, une production de mucus, une exacerbation de l'asthme, des bronchites chroniques et une sensibilisation aux infections respiratoires. Le nombre des admissions à l'hôpital pour des cardiopathies et la mortalité augmentent les jours de fortes concentrations en SO_2 .

4.4.3. Valeurs limites

20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ moyenne sur 24 heures

500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ moyenne sur 10 minutes

La concentration de SO_2 ne doit pas dépasser 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne sur 10 minutes. Selon certaines études, une proportion d'asthmatiques voient leur fonction pulmonaire s'altérer et des symptômes respiratoires apparaître après une exposition au SO_2 de seulement 10 minutes.

On sait maintenant que le SO_2 a des effets sur la santé à des concentrations bien plus faibles qu'on ne le soupçonnait auparavant. Il faut s'en protéger davantage. Bien que l'on ne connaisse pas encore exactement la cause des effets du SO_2 à de faibles concentrations, il est probable qu'en abaissant celles-ci on obtiendra aussi une réduction de l'exposition aux polluants associés.

5. NATURE ET EFFETS SUR L'ENVIRONNEMENT DES POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUES

5.1. Effets des polluants atmosphériques sur le milieu

Les polluants, émis par les industries (dont l'agriculture intensive) et les voitures, pénètrent dans l'atmosphère et participent après transformation à **l'acidification et à l'eutrophisation des milieux naturels**. Par exemple, la réaction du SO_2 présent dans l'atmosphère avec l'eau produit, par oxydation et hydrolyse, de l'acide sulfurique, principal composant des **pluies acides** à l'origine de phénomènes de déforestation. Les oxydes d'azote produisent de leur côté des acides nitriques tout aussi dévastateurs. Ces « nuages acides » peuvent se déplacer à plus de 1 500 km de la source de pollution. À partir de l'atmosphère, ces acides engendrent soit des dépôts secs (qui se déposent au sol puis sont lessivés vers les eaux de surface), soit des dépôts humides (pluie, neige, brouillard).



Figure 7 – Effet des pluies acides sur un massif forestier

Ces acides, comme les **dépôts d'ammoniac et de particules** venant des retombées, **modifient la qualité des eaux et des sols** dans les milieux naturels et favorisent, selon leur forme chimique, **leur acidification et l'eutrophisation**.

Un dépôt d'ammoniac ou d'ammonium **acidifie les sols** et touche ainsi les écosystèmes sensibles. Sur les sols agricoles, l'acidification peut être compensée par le chaulage. En se déposant, les particules secondaires peuvent ainsi constituer un **apport supplémentaire d'azote** pour les écosystèmes. Ces dépôts peuvent favoriser la croissance de certaines espèces de la faune et de la flore au détriment d'autres espèces, et provoquer localement **une perte de biodiversité**.

Certains phénomènes naturels sont également à l'origine de l'émission de particules primaires. C'est le cas notamment de l'érosion éolienne, des embruns marins, des éruptions volcaniques et des feux de brousse et de forêt.

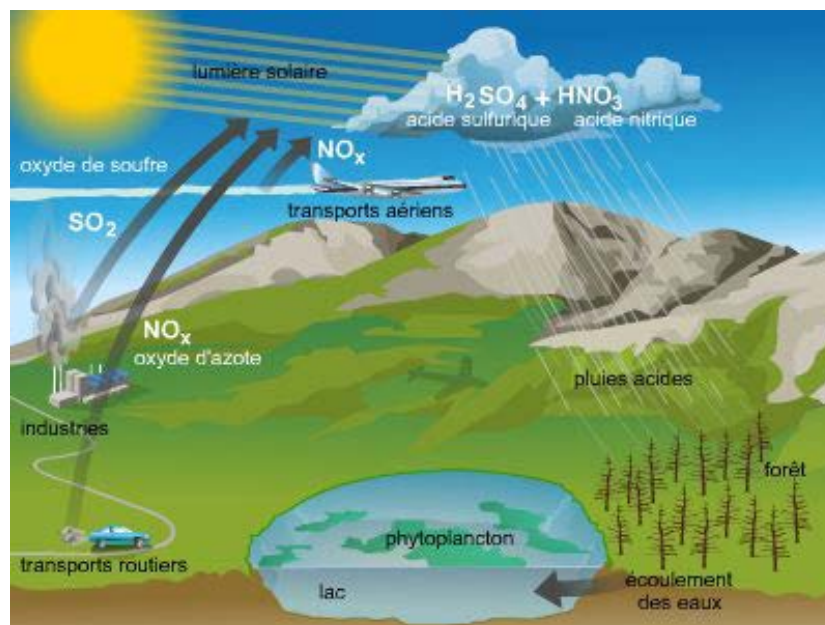


Figure 8 – Schéma illustrant la formation des pluies acides (source : Larousse)

Les particules sont aussi impliquées dans **le transport et le dépôt de polluants toxiques** (métaux ou polluants organiques persistants, comme les dioxines).

Les polluants atmosphériques jouent également un rôle dans **le réchauffement climatique** (cas des gaz à effet de serre, notamment émis lors des activités agricoles). Par contre, les effets des particules sur le changement climatique sont plus complexes, car difficiles à quantifier. Selon la nature des particules, le rayonnement solaire est absorbé (il crée alors de la chaleur) ou réfléchi (il refroidit alors l'air). Les particules les plus fines peuvent aussi servir de noyaux de condensation lors de la formation des nuages et influencer ainsi sur les régimes hydrologiques.

Enfin, **des liens étroits unissent la pollution particulaire et la formation d'ozone**. En effet, les particules primaires ont un impact sur les réactions photo-oxydantes à l'origine de la formation d'ozone.

Les polluants atmosphériques vont aussi impacter directement les processus physiologiques de la **végétation**. C'est le cas notamment de l'ozone et du CO_2 . Une exposition à des concentrations élevées d'ozone influence négativement l'activité photosynthétique, alors qu'une exposition à des concentrations élevées de CO_2 l'influence positivement (effet fertilisant du CO_2). Des concentrations élevées en CO_2 ont également un effet anti-transpirant par réduction du nombre de stomates et de leur ouverture, ce qui induit une consommation plus efficace de l'eau.

L'augmentation d'oxydes d'azote (NO_x), de méthane (CH_4) ou de monoxyde de carbone (CO) induit, par une série de réactions photochimiques, une augmentation de l'ozone présent dans l'atmosphère, ce qui a des **effets toxiques sur les plantes**.

Par contre, les **effets des particules sur la végétation** sont assez mal connus. On note néanmoins une limitation des échanges gazeux chez les plantes, une cuticule dégradée ou encore une photosynthèse réduite.

5.2. Les gaz à effet de serre

L'« effet de serre » est **un phénomène naturel** permettant de maintenir une température moyenne de 15 °C à la surface de la Terre. Grâce à l'effet de serre, une partie de l'énergie du rayonnement solaire qui arrive sur notre planète est retenue à la surface de la Terre par les gaz à effet de serre, tandis qu'une autre partie est renvoyée vers l'espace. **Sans ce phénomène, la vie sur Terre serait impossible.**

Mais les émissions anthropiques de gaz à effet de serre (**GES**) augmentent leur concentration dans l'atmosphère et, par conséquent, **la quantité de chaleur retenue à la surface de la Terre augmente également**. C'est ce phénomène qui est à l'origine à la fois du **réchauffement climatique** et du **dérèglement climatique**.

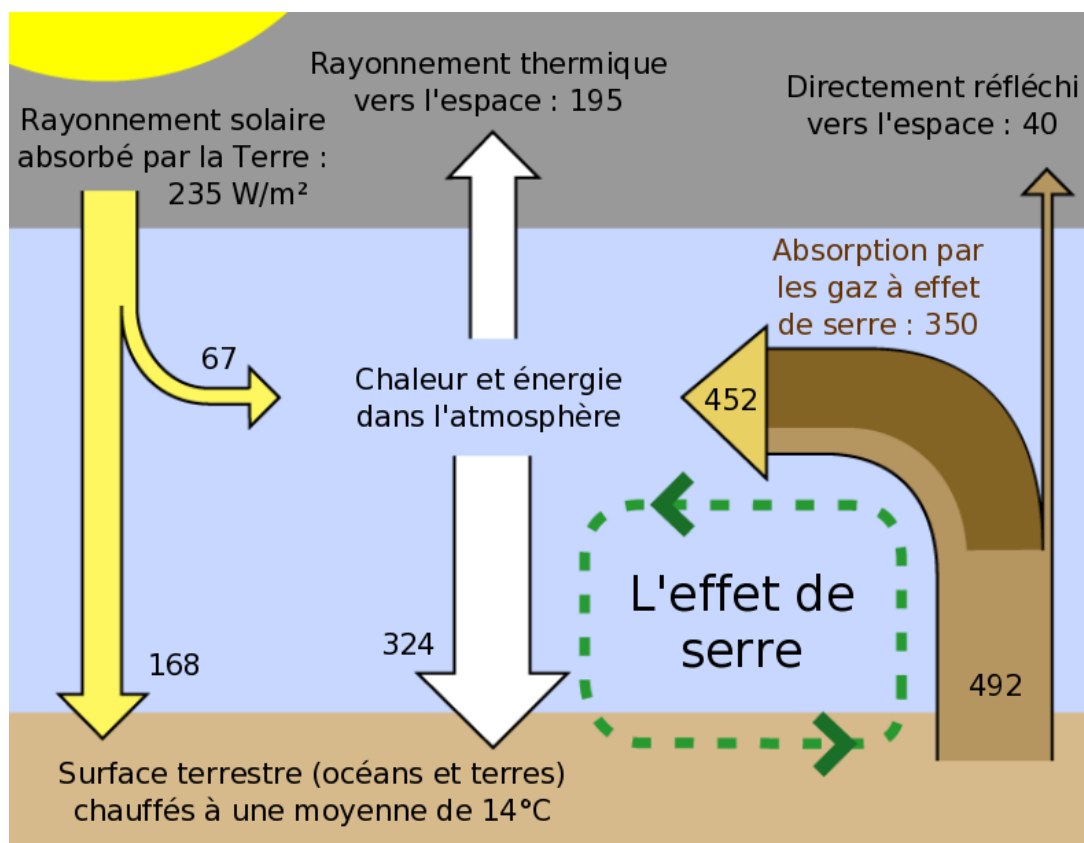


Figure 9 – Le principe de l'effet de serre (chiffres en W/m^2)

Les différents GES n'ont pas le même impact sur le réchauffement de l'atmosphère. La contribution à l'effet de serre de chaque GES s'exprime grâce à un indicateur appelé **pouvoir de réchauffement global (PRG)**, unité de mesure qui correspond à l'effet d'un gaz sur le réchauffement de l'atmosphère cumulé sur une durée de 100 ans. Cette valeur se mesure par rapport au CO_2 . Par exemple, 1 kg de CH_4 émis dans l'atmosphère produira le même effet, sur un siècle, que l'émission de 25 kg de CO_2 .

Puisque les différents GES n'ont pas le même impact sur le climat et pour pouvoir les comparer, ils sont mesurés en équivalent CO_2 (**éq CO_2**). Cette unité commune se calcule de la façon suivante :

$$\text{Tonne d'équivalent } \text{CO}_2 \text{ d'un gaz} = \text{tonne du gaz} \times \text{PRG de ce gaz}$$

Tableau 3 – Pouvoir de réchauffement global (PRG) des GES (source : 4^e rapport du GIEC, 2007)

Nature du GES	Durée de vie dans l'atmosphère	Pouvoir de réchauffement global
CO ₂	100 ans	1 (par convention)
CH ₄	1 an	25
N ₂ O	120 ans	298

5.3. Contribution de l'agriculture à la pollution atmosphérique

5.3.1. Nature des polluants atmosphériques générés par l'agriculture

Les polluants atmosphériques générés par l'agriculture sont des gaz dispersés dans l'air (principalement l'oxyde nitreux –N₂O–, l'ammoniac –NH₃– et le méthane –CH₄) **ou des particules, solides ou liquides, en suspension dans l'air**. Ce sont des polluants « primaires » (comme tous les polluants atmosphériques générés par l'activité humaine). Mais dans l'atmosphère, les gaz libérés par l'agriculture sont susceptibles de se combiner à d'autres éléments présents dans l'air, notamment les oxydes d'azote ou de soufre, pour former des polluants « secondaires ». La pollution particulaire de l'atmosphère résultante est donc à la fois primaire et secondaire.

5.3.2. Agriculture et effet de serre

L'agriculture rejette du **méthane** (CH₄ – **élevage et sols**), du **protoxyde d'azote** (N₂O – fertilisation azotée et gestion des déjections animales) et du **dioxyde de carbone** (CO₂ – consommation d'énergie). Selon son impact sur le changement d'affectation des sols et ses pratiques, l'agriculture peut favoriser le stockage ou le déstockage du carbone dans les sols. L'agriculture représente près de 13,5 % des émissions de gaz à effet de serre, sans compter les émissions liées à la déforestation qui s'élèvent à 17 %. L'agriculture est responsable de plus de 70 % des émissions mondiales de protoxyde d'azote et de 50 % des émissions de méthane.

Entre 1990 et 2004, les émissions de l'agriculture ont connu une croissance modeste, de l'ordre de 13 % environ (méthane et protoxyde d'azote principalement). Cependant, **on note des différences importantes entre les pays en développement et émergents**, où les émissions agricoles ont largement augmenté (+28 %), alors qu'elles ont baissé dans les pays industrialisés (-12 %).

Si les émissions d'origine agricole sont en baisse dans la plupart des pays industrialisés, la mondialisation des échanges et la croissance démographique expliquent en partie la forte hausse des émissions agricoles dans les pays en développement. De même, si le méthane est le principal gaz émis au sud, c'est le protoxyde d'azote qui arrive en tête des émissions agricoles au nord (ADEME, 2010).

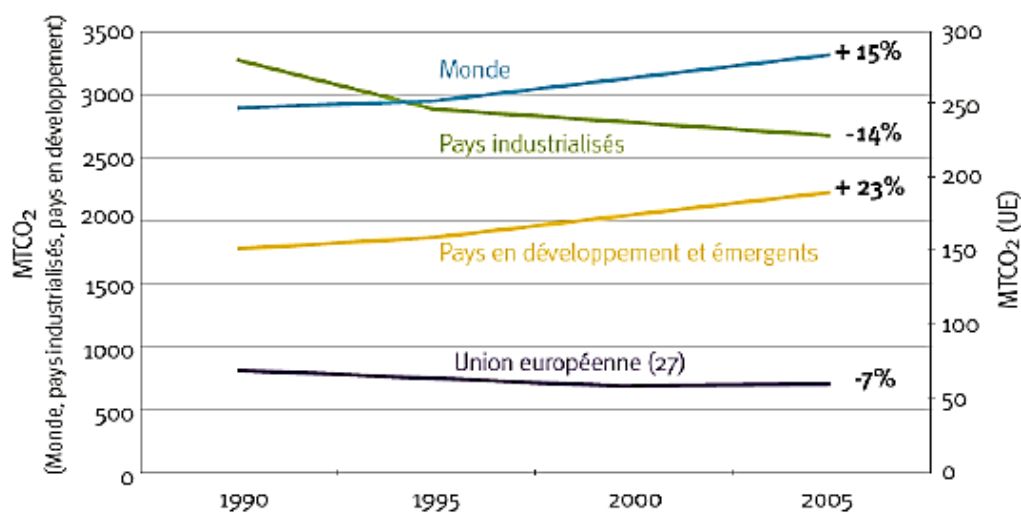


Figure 10 – Émission de méthane d'origine agricole (source : FAO stat)

Les zones agricoles sont ainsi des sources majeures de polluants atmosphériques dont les plus connus sont les GES (ou gaz à effet de serre) et les particules fines. En 2012, la production végétale et l'élevage participaient à presque 24 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre. Selon le rapport 2015 sur la qualité de l'air publié par l'Agence européenne de l'environnement (AEE), l'agriculture en UE-28, est ainsi le premier secteur émetteur d'ammoniac⁴ (NH_3) et de méthane, et le troisième émetteur de PM_{10} primaires.

Comme d'autres secteurs d'activité, l'agriculture est une source de pollution atmosphérique. Elle participe aux émissions vers l'atmosphère de composés azotés, notamment l'ammoniac (NH_3) et les oxydes d'azote (NO_x), de particules et de pesticides. Ces émissions sont liées aux pratiques d'élevage (bâtiments, stockage, épandage...) et aux pratiques culturales (préparation du sol, fertilisation, récolte...).



Figure 7 – Exemples de pratiques culturales pouvant entraîner une pollution atmosphérique

Les substances émises par l'agriculture forment ainsi un véritable cocktail de polluants chimiques dans l'air, qui constitue une « pollution atmosphérique », soit « l'introduction par l'homme, directement ou indirectement, dans l'atmosphère et les espaces clos, de substances ayant des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes, à influencer sur les changements climatiques, à détériorer les biens matériels, à provoquer des nuisances olfactives » (définition de la pollution atmosphérique au sens de la loi française sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie, 1996).

Les émissions d'origine agricole ont la particularité d'être à la fois ponctuelles (bâtiments et stockage) et diffuses (prairies, cultures). D'intensité surfacique relativement faible, les émissions diffuses sont toutefois significatives, car elles ont lieu sur de grandes étendues. Elles sont par ailleurs très sensibles aux conditions météorologiques et au type de sol, ce qui les rend très variables dans l'espace et dans le temps, et rend leur prévision difficile.

5.4. Effet de la pollution atmosphérique sur l'agriculture

Les zones agricoles et sylvicoles sont à la fois des sources et des puits de polluants atmosphériques. Elles peuvent être **affectées par les dépôts de polluants atmosphériques** à différents niveaux. Les **rendements agricoles** sont également influencés par les polluants atmosphériques. Une forte exposition à l'**ozone**, oxydant puissant agissant notamment sur la photosynthèse, provoque des baisses de production au niveau des cultures et des forêts qui peuvent varier de 3 à 20 %. Ces pertes représentent un enjeu économique important et, dans certains pays, représentent une menace pour la sécurité alimentaire.

À l'opposé, des concentrations élevées en CO_2 atmosphérique ont une influence positive sur la photosynthèse. C'est ce qu'on appelle l'**effet fertilisant du CO_2** . Le CO_2 présente aussi un **effet anti-transpirant** : l'augmentation de CO_2 dans l'atmosphère réduit le nombre et l'ouverture des stomates, ce qui réduit la transpiration de la plante et induit une consommation plus efficace de l'eau.

Les exploitations agricoles situées près des axes routiers peuvent subir une perte de **qualité sanitaire des denrées alimentaires** en raison du dépôt de polluants tels que les **éléments traces métalliques (ETM, dont les métaux lourds comme Pb et Cd) et les POP qui s'accumulent sur le sol et les végétaux. L'impact sur la santé de la consommation de ces produits est encore mal connu**, mais des distances de sécurité entre les cultures et les axes routiers sont préconisées dans certaines filières alimentaires.

6. DONNER UN CADRE À LA GESTION DE LA QUALITÉ DE L'AIR

6.1. La nécessité d'agir de manière concertée

La plupart des sources de pollution de l'air extérieur échappent totalement au contrôle des individus et nécessitent une action concertée au niveau local, national et régional des responsables des secteurs des transports, de l'énergie, de la gestion des déchets, de l'urbanisme et de l'agriculture.

On trouve de nombreux exemples de politiques qui sont parvenues à réduire la pollution de l'air, dans les domaines des transports, de l'urbanisme, de la production d'électricité et de l'industrie :

- **industrie** : promouvoir les technologies non polluantes qui limitent les émissions de cheminées industrielles, et la gestion améliorée des déchets urbains et agricoles, y compris par l'ouverture de sites de captage du méthane provenant des déchets (à utiliser comme biogaz), en tant que solution de rechange à l'incinération ;
- **énergie** : garantir l'accès à des solutions propres et financièrement abordables pour la cuisine, le chauffage et l'éclairage ;
- **transports** : effectuer la transition vers des modes de production d'électricité non polluante; favoriser les transports publics rapides, la marche et les pistes cyclables dans les villes, ainsi que le transport interurbain des marchandises et des passagers ; utiliser en priorité des véhicules diesel à usage industriel plus écologiques, ainsi que des véhicules et des carburants à faible émission, notamment des carburants à faible teneur en soufre ;
- **urbanisme** : améliorer le rendement énergétique des bâtiments ; rendre les villes plus vertes, et donc plus économes en énergie ;
- **production d'électricité : généraliser l'utilisation de combustibles à faible émission et de sources d'énergie renouvelables ne nécessitant aucune combustion** (p. ex., solaire, éolienne ou hydroélectrique); promouvoir la cogénération de chaleur et d'électricité; et favoriser la production d'énergie décentralisée (p. ex., à l'aide de mini-réseaux ou de panneaux solaires de toiture) ;
- **gestion des déchets urbains et agricoles** : mettre en œuvre des stratégies de réduction, de séparation, de recyclage, de réutilisation et de retraitement des déchets ; les méthodes améliorées de gestion biologique des déchets, comme la digestion anaérobie des déchets afin de produire du biogaz, représentent des solutions alternatives à l'incinération de déchets solides en plein air, tout en étant d'un coût abordable. Quand on ne peut en faire l'économie, l'incinération de déchets doit impérativement reposer sur des technologies de combustion associées à des contrôles stricts des émissions.

6.2. Conclure des accords internationaux

Le **Protocole de Kyoto** (1997) est le résultat de négociations politiques entre les États-Unis, l'Union européenne et les pays en développement.

L'objectif était de limiter les émissions de 6 GES – dioxyde de carbone (CO_2), méthane (CH_4), protoxyde d'azote (NO), hydrofluorocarbures (HFC), perfluorocarbures (PFC) et hexafluorure de soufre (SF_6) – en fixant des quotas d'émissions pour les pays développés, considérés comme les plus gros émetteurs de GES. D'ici 2020, les émissions de GES des pays engagés par le Protocole de Kyoto devaient être inférieures à celles de 2012.

Pour ce faire, la plupart de ces pays avaient décidé de **réduire d'au moins 5 % leurs émissions** de GES, objectif qui a été atteint. Cependant, **les émissions de GES dans les pays émergents ayant augmenté pendant la période** d'effectivité du protocole de Kyoto, **la concentration atmosphérique de CO₂ a augmenté de plus de 10 %**.

La mobilisation de la communauté internationale à travers le Protocole de Kyoto a été jugée insuffisante au regard des enjeux climatiques. De plus, l'absence de sanctions en cas de non-respect des engagements, la non-implication des pays en développement et des pays émergents, et la priorité donnée au développement économique et industriel ont également fait l'objet de critiques.

À la suite de ces critiques et à l'inefficacité du Protocole de Kyoto, un nouvel accord a été trouvé lors de la **COP21** (conférence de Paris sur le climat), l'**Accord de Paris**.

L'objectif de la COP21 était de définir un nouveau protocole sur les émissions de GES afin de maintenir le réchauffement climatique sous la barre des 2 °C. **Pour cela**, l'Accord de Paris prévoit que tous les pays engagés revoient tous les cinq ans ses engagements liés à la diminution des émissions de GES. De plus, il reconnaît une responsabilité partagée, mais néanmoins différenciée de tous les États, ce qui n'était pas le cas pour le Protocole de Kyoto. L'Accord de Paris est entré en vigueur le 4 novembre 2016 après ratification par 55 pays représentant au moins 55 % des émissions de gaz à effet de serre.

Le 8 mai 2017, 145 pays représentant 82,95 % des émissions de GES avaient ratifié l'accord.



6.3. Disposer d'un cadre juridique sur la qualité de l'air

Nous retiendrons ici les grandes lignes du cadre réglementaire sur la qualité de l'air, en ciblant principalement la législation relative aux polluants atmosphériques générés par les activités agricoles. Il est conseillé de se référer au détail de chacune des directives pour trouver les valeurs limites.

Au départ d'une « **directive-cadre** »⁵ sont issues divers compléments législatifs.

a) La directive 2008/50/CE : elle définit des objectifs en matière de qualité de l'air, notamment des mesures ambitieuses et efficaces au regard de leur coût pour améliorer la santé humaine et la qualité environnementale d'ici à 2020. Elle définit également les façons d'évaluer ces mesures et de prendre des mesures correctives si les objectifs ne sont pas atteints. Elle prévoit que le public en soit informé. Cette directive permet de fusionner la plupart de la législation existante⁶ en matière de qualité de l'air en un seul acte, qui comprend les éléments clés suivants.

5 Selon le même principe, il existe une directive-cadre sur l'eau.

6 La directive 96/62/CE concernant l'évaluation et la gestion de la qualité de l'air ambiant, ainsi que : la directive 1999/30/CE relative à la fixation de valeurs limites pour l'anhydride sulfureux, le dioxyde d'azote et les oxydes d'azote, les particules et le plomb dans l'air ambiant, la directive 2000/69/CE concernant les valeurs limites pour le benzène et le monoxyde de carbone dans l'air ambiant, la directive 2002/3/CE relative à l'ozone dans l'air ambiant et la décision 97/101/CE établissant un échange réciproque d'informations et de données provenant des réseaux et des stations individuelles mesurant la pollution de l'air ambiant dans les États membres.

- **Des seuils, des valeurs limites et des objectifs chiffrés sont définis** pour évaluer la présence de chacun des polluants couverts par la directive : l'anhydride sulfureux, le dioxyde d'azote, les particules, le plomb, le benzène et le monoxyde de carbone.
- Les autorités nationales sont chargées de désigner des **organismes spécifiques** pour mener à bien ces tâches, en utilisant les données collectées sur des points de prélèvements sélectionnés.
- Lorsque les niveaux de pollution excèdent les seuils prévus à un certain emplacement, **des plans relatifs à la qualité de l'air doivent être introduits** pour y remédier. Ils peuvent comporter des mesures spécifiques afin de protéger des groupes vulnérables, comme les enfants.
- S'il existe un risque de dépassement des seuils autorisés du niveau de pollution, **des plans d'action à court terme doivent être mis en œuvre**, imposant, par exemple, la réduction de la circulation routière, des travaux de construction ou de certaines activités industrielles, afin de prévenir ce risque.
- Les autorités nationales doivent s'assurer que le public, ainsi que les associations environnementales, de consommateurs et autres, y compris les organismes de soins de santé et les fédérations professionnelles, sont **informés de la qualité de l'air ambiant** (ou de l'air extérieur) dans leur zone.
- Les gouvernements européens doivent publier des rapports annuels relatifs à l'ensemble des polluants couverts par cette directive.

b) La directive-cadre sur la qualité de l'air (directive du Conseil 96/62/CE) : elle est prévue par le cinquième programme d'action pour l'environnement, énonce **les principes fondamentaux d'une stratégie** commune visant à établir des objectifs de qualité de l'air ambiant en vue de réduire ou de prévenir des effets nocifs pour l'environnement et la santé par l'établissement d'objectifs de qualité de l'air ambiant ; la mise en place de méthodes et critères communs d'évaluation de la qualité de l'air et la dissémination des informations sur la qualité de l'air.

Des valeurs limites et des seuils d'alerte sont proposés pour les polluants suivants :

- l'anhydride sulfureux, le dioxyde d'azote et les oxydes d'azote, les particules et le plomb ;
- le benzène et le monoxyde de carbone ;
- l'ozone ;
- les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), le cadmium, l'arsenic, le nickel et le mercure.

Selon cette directive-cadre, **la qualité de l'air ambiant doit être contrôlée** sur tout le territoire des États membres. Cette évaluation s'effectue par différentes méthodes : soit par mesurage, soit par modélisation mathématique, soit par une combinaison de ces deux méthodes, soit par estimation. Cette évaluation est obligatoire dans les agglomérations de plus de 250 000 habitants ou dans les zones où les concentrations sont proches des valeurs limites.

En cas de dépassement des valeurs limites, les États membres doivent établir un **programme permettant d'atteindre les valeurs limites** dans un délai fixé. Ce programme, accessible à la population, doit notamment contenir les renseignements suivants :

- le lieu de dépassement de la pollution ;
- la nature et l'évaluation de la pollution ;
- l'origine de la pollution.

Les États sont dans l'obligation d'établir **une liste des zones et des agglomérations où les niveaux de pollution sont supérieurs aux valeurs limites**. En cas de dépassement des seuils d'alerte, les États membres informent la population et transmettent à la Commission toute information pertinente (niveau enregistré de pollution, durée de l'alerte etc.). Dans le cas où certaines zones géographiques et agglomérations ont des niveaux de pollution inférieurs aux valeurs limites, les États membres doivent maintenir ces niveaux en dessous de celles-ci.

- c) **La directive 1999/30/CE** : afin de maintenir ou d'améliorer la qualité de l'air ambiant, l'Union européenne établit des **valeurs limites** pour les concentrations d'anhydride sulfureux, de dioxyde d'azote et d'oxyde d'azote, de particules et de plomb, et des seuils d'alerte pour les concentrations d'anhydride sulfureux et de dioxyde d'azote dans l'air ambiant. En outre, elle fixe des méthodes et des critères communs pour permettre d'évaluer les concentrations et elle réunit les informations appropriées sur les concentrations afin d'informer le public.

6.4. Disposer d'un cadre juridique sur les rejets autorisés

- a) **La directive 2001/81/CE fixant des plafonds d'émission nationaux pour certains polluants atmosphériques** a été adoptée le 23 octobre 2001⁷. Elle vise à limiter les émissions des polluants acidifiants et eutrophisants, et des précurseurs de l'ozone afin d'améliorer dans la Communauté la protection de l'environnement et de la santé humaine contre les risques d'effets nuisibles provoqués par l'acidification, l'eutrophisation des sols et l'ozone au sol, et de se rapprocher de l'objectif à long terme consistant à ne pas dépasser les niveaux et charges critiques et à protéger efficacement tous les individus contre les risques connus pour la santé dus à la pollution de l'air en fixant des plafonds nationaux d'émission avec pour référence les années 2010 et 2020 et en procédant à des révisions successives.

Elle fixe pour chacun des États membres **des plafonds d'émission** de dioxyde de soufre (SO_2), d'oxyde d'azote (NO_x), de composés organiques volatils (COV) et d'ammoniac (NH_3). Cette directive prévoit aussi que les États membres établissent un programme national de réduction des émissions afin de respecter en 2010 les plafonds fixés pour les émissions ces quatre polluants. La Commission européenne s'est engagée à diminuer, d'ici 2020, de presque de moitié les excès de dépôts acides des zones où les écosystèmes sont soumis à l'eutrophisation. Cela implique, au niveau européen, une **réduction globale des émissions d'ammoniac de 27 % d'ici 2020** par rapport à 2000.

- b) **La directive 2004/107/CE** du Parlement européen et du Conseil, du 15 décembre 2004, concerne **l'arsenic, le cadmium, le mercure, le nickel et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)** dans l'air ambiant. Cette directive est la dernière étape du processus de refonte de la législation européenne, lancé par la directive-cadre 96/62/CE, concernant la présence de polluants présentant des risques pour la santé

7 Dans le cadre de la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance, adoptée à Genève en 1979, il a été signé à Göteborg, en 1999, un protocole relatif à la réduction de l'acidification, de l'eutrophisation et de l'ozone troposphérique.

humaine. Étant donné que les **substances visées sont des agents cancérogènes** pour l'homme, pour lesquels il n'existe pas de seuils identifiables concernant leurs effets nocifs sur la santé des personnes, la présente directive vise à appliquer le principe d'une exposition aussi faible que possible à ces polluants. Elle ne fixe pas de valeur limite pour les émissions d'hydrocarbures aromatiques polycycliques, mais elle utilise le benzo(a)pyrène comme traceur du risque cancérogène lié à ces polluants et établit pour cette substance une valeur cible à respecter dans la mesure du possible.

- c) **La directive 2010/75/UE relative aux émissions industrielles**, appelée **directive IED**, définit au niveau européen une approche intégrée de la prévention et de la réduction des pollutions émises par les installations industrielles et agricoles entrant dans son champ d'application. Elle a pour objectif de parvenir à un niveau élevé de protection de l'environnement grâce à une prévention et à une réduction intégrées de la pollution provenant d'un large éventail d'activités industrielles et agricoles. Elle est le pendant pour les risques chroniques de la directive 2012/18/UE du 4 juillet 2012 dite directive Seveso 3.

Un de ses principes directeurs est le recours aux meilleures techniques disponibles (MTD) afin de prévenir les pollutions de toute nature. Elle impose aux États membres de fonder les conditions d'autorisation des installations concernées sur les performances des MTD.

La directive IED remplace la directive 2008/1/CE, dite directive IPPC, relative à la prévention et à la réduction intégrées de la pollution.

Elle réunit en un seul texte sept directives préexistantes distinctes relatives aux émissions industrielles et renforce tous les grands principes de la directive IPPC, en élargissant légèrement le champ d'application et en introduisant de nouvelles dispositions en matière de remise en état des sols. Elle renforce également la participation du public. Ses principes directeurs sont :

- le recours aux MTD dans l'exploitation des activités concernées ; les MTD doivent être le fondement de la définition des valeurs limites d'émission (VLE) et des autres conditions de l'autorisation
- le réexamen périodique des conditions d'autorisation
- la remise en état du site dans un état au moins équivalent à celui décrit dans un « rapport de base » qui décrit l'état du sol et des eaux souterraines avant la mise en service.

6.5. Établir des normes relatives aux valeurs maximales d'exposition sur les lieux de travail

Depuis 2017, la Commission européenne a défini une nouvelle liste de valeurs limites indicatives d'exposition professionnelle (VLIEP) pour protéger les travailleurs contre les risques liés à l'exposition aux produits chimiques dangereux (directive 2017/164). Il s'agit d'une liste de 31 agents chimiques, parmi lesquels on retrouve le monoxyde de carbone, le dioxyde de soufre, le cyanure d'hydrogène, le manganèse et le diacétyle.

Les **valeurs limites indicatives d'exposition professionnelle** (VLIEP) sont les limites de la moyenne pondérée en fonction du temps de la concentration d'un agent chimique dans l'air de la zone de respiration d'un travailleur au cours d'une période de référence

déterminée. Les VLIEP sont liées à la santé, déterminées sur la base des données scientifiques les plus récentes et adoptées par la Commission européenne. Les VLIEP doivent aider les employeurs à définir et à évaluer les risques et à appliquer des mesures de protection et de prévention. Il s'agit en effet du seuil d'exposition au-dessous desquels, en général, les agents chimiques concernés ne devraient avoir aucun effet nuisible après une exposition de courte durée ou une exposition quotidienne durant toute une vie professionnelle.

Les valeurs limites indicatives sont mesurées sur :

- une période de référence de 8 heures (en moyenne pondérée dans le temps, valeurs limites d'exposition de long terme) ; et
- une période de référence plus courte pour certains agents chimiques, en général 1 minutes (en moyenne pondérée dans le temps, valeurs limites d'exposition à court terme).

Pour tout agent chimique assorti d'une valeur limite indicative d'exposition professionnelle au niveau européen, les États membres sont tenus d'établir une valeur limite nationale d'exposition professionnelle et, ce faisant, de tenir compte évidemment de la valeur limite au niveau européen ainsi que de la législation et de la pratique nationales.

7. ANNEXE : TECHNIQUES DE MESURE DE LA QUALITÉ DE L'AIR

A1. Types d'air

L'air intérieur est celui contenu dans les environnements enclos tels que les habitations, les établissements de santé ou encore les moyens de transport. Cet espace dynamique est caractérisé par une pollution en provenance de l'extérieur et une pollution d'origine interne, liée au bâtiment et aux occupants. La pollution intérieure constitue une préoccupation croissante de nos sociétés contemporaines, car les bâtiments sont de mieux en mieux isolés, ce qui réduit les déperditions d'énergie, mais limite drastiquement le renouvellement d'air.

Mesurer l'air ambiant consiste à déterminer quantitativement les principaux polluants que l'on peut y rencontrer. L'approche normative générale vise des objectifs de différentes natures tels que la réduction des risques sanitaires pour les groupes humains, le suivi des valeurs limites de protection des cultures ou des écosystèmes (cas de l' O_3). Les périodes de temps considérées varient en fonction du polluant concerné et de l'objectif visé : année civile, période estivale, journée, ou heure. Selon les cas, les modes de calcul seront : moyenne (annuelle, journalière), moyenne glissante (sur 8 heures), médiane ou encore percentiles.

A2. Prélèvements

Le prélèvement et l'analyse de l'air intérieur ou ambiant constitue une mesure directe de la pollution et vise une quantification spécifique de l'exposition des cibles déterminées dans l'étude des risques. Deux modes de prélèvements sont à considérer : **1) le mode actif** (par pompage) où l'air est entraîné sur le système de prélèvement ; **2) le mode passif** (sans pompage) où la diffusion conduit le polluant au système de prélèvement. Le prélèvement actif permet une analyse quantitative, alors que le prélèvement passif, par son temps d'exposition plus long, permet un lissage des mesures pour éviter les variations ponctuelles. Pour les prélèvements de type sorption sur support, deux modes de désorption pour analyse sont envisageables : la désorption thermique et la désorption par solvant.

A3. Systèmes de mesure

- Système de mesure en temps réel

Les appareils d'analyse en continu peuvent déterminer, de façon spécifique, la présence d'un ou plusieurs polluants déterminés tels que les NO_x , le dioxyde de carbone ou encore les particules en suspension (PM_{10} , $PM_{2,5}$). La détection dans ces systèmes est basée sur une propriété physico-chimique du polluant. Les appareils d'analyse aspirent, en continu, l'air à travers une chambre de réaction et délivrent en permanence un signal de mesure représentatif de la concentration instantanée. Ce type d'appareillage est utilisé dans les « réseaux télémétriques » pour suivre, à distance, la qualité de l'air.

- Système de mesure en temps différé

Il s'agit de techniques largement éprouvées pour lesquelles la prise d'échantillons sur site est automatisée et l'analyse est effectuée en laboratoire, après récolte des échantillons. Lors de la prise d'échantillon, l'air est aspiré avec un débit constant à travers un « piège » où le polluant est retenu. Le volume total échantillonné est calculé

à partir de la durée d'échantillonnage et du débit ; l'analyse donne la masse totale de polluant prélevée et, à partir de ces deux grandeurs, on peut calculer la concentration moyenne pendant la période d'échantillonnage. L'analyse de l'aspect dynamique de la pollution n'est pas possible. De plus, les résultats des mesures sont connus avec un délai d'une à deux semaines, ce qui rend la fonction d'avertissement impossible. Les résultats sont cependant du plus grand intérêt pour l'interprétation statistique et pour l'étude de la pollution de l'air.

- Mesure de routine dans l'air ambiant

Les systèmes de mesure en temps différé sont généralement privilégiés. Il s'agit de systèmes d'échantillonnage automatisés de la phase gaz seule ou des phases gaz et particulaire.

Pour l'ammoniac

D'une façon générale, l'ammoniac est piégé pour former un sel d'ammonium après réaction avec une solution acide. Le piégeage se fait directement par barbotage, sur un filtre imprégné ou dans un tube garni de gel de silice imprégné. L'analyse en laboratoire s'effectue soit directement, soit après extraction du support d'imprégnation, par spectrophotométrie UV-visible selon une méthode dite au bleu d'indophénol (norme NFT90-015-24), soit par chromatographie ionique avec une détection conductimétrique. Ces méthodes sont très précises et permettent d'atteindre une limite de détection inférieure à 1 ppb ; cependant, les aérosols contenant l'ion ammonium peuvent également être piégés lors du prélèvement et fausser les résultats. C'est la raison pour laquelle les appareils de prélèvement assurent généralement un prélèvement conjoint des phases particulaire et gazeuse.

Pour les poussières

Il existe toute une série de méthodes de mesure pouvant servir à déterminer de manière sélective la grandeur des poussières en suspension ou certains de leurs composants. Parmi elles figurent les méthodes gravimétriques manuelles, qui consistent à recueillir des échantillons de poussière sur des filtres ou des feuilles, puis à les peser après les avoir conditionnés à l'humidité et la température prescrites.

Exemple : appareils de mesure *High Volume Sampler* aspirant de grands volumes (env. 30 m³/h) à travers un filtre. Les différentes têtes d'échantillonnage pour PM₁₀ ou PM_{2.5} fixent les particules du flux d'air selon leur grandeur avant le prélèvement d'échantillons. Les méthodes automatiques, quant à elles, enregistrent en continu un signal qui ne correspond pas directement à une pesée selon la méthode de référence qu'est la gravimétrie manuelle. Le signal mesuré doit être converti en une concentration massique et vérifié par la méthode de référence.



Chapitre 2

Impacts des pratiques culturelles sur la qualité de l'air

Influence des pratiques agricoles sur la qualité de l'air	30
Pollution atmosphérique par les matières fertilisantes.....	37
Pollution atmosphérique par les produits phytopharmaceutiques	42

Objectifs pédagogiques

À l'issue de ce chapitre, l'apprenant sera capable :

- De comprendre l'effet des pratiques agricoles sur la qualité de l'air et les relations complexes entre agriculture et qualité de l'air
- De distinguer le rôle des engrais et des autres intrants dans la pollution atmosphérique
- De comprendre comment les matières fertilisantes impactent la qualité de l'air
- De comprendre les mécanismes de dispersion des polluants dans l'air
- De comprendre comment les pesticides contaminent l'atmosphère et se dispersent via l'air

1. INFLUENCE DES PRATIQUES AGRICOLES SUR LA QUALITÉ DE L'AIR

1.1. L'agriculture : un secteur particulier en ce qui concerne la pollution de l'air

Il est reconnu que l'agriculture participe largement à l'altération de la qualité de l'air, **d'autant plus que les pratiques adoptées sont agressives pour le milieu et éloignées des principes de l'agro-écologie**. Les interactions entre qualité de l'air et pratiques agricoles est un sujet émergent et récurrent.

Le paradoxe de l'agriculture, c'est que les zones agricoles ont la particularité d'être, **en fonction des pratiques adoptées** (agriculture conventionnelle vs agriculture agro-écologique ou biologique), **tantôt des sources, tantôt des puits** pour les polluants de l'air. On considère que l'agriculture industrielle est responsable actuellement de près de 35 % des émissions de gaz à effet de serre (GES : CO₂ et méthane notamment), alors que, d'un autre côté, les sols agricoles sont des puits de carbone très importants. L'agriculture apparaît aussi comme un **secteur particulier** :

- **émetteur** de GES et de polluants atmosphériques (principalement de l'ammoniac, NH₃) ;
- **victime** de la pollution atmosphérique (diminution des rendements, dégradation de la qualité des sols, des eaux et des produits végétaux, dégradation de la biodiversité, etc.).

L'altération de la qualité de l'air peut être due à la présence, d'origine naturelle ou anthropique :

- de **polluants biologiques** : pollen, virus, bactéries, spores, excréments d'acariens (ceux-là sont présents quelles que soient les pratiques).
- de **polluants physiques** : **des poussières arrachées au sol** par l'érosion éolienne ou émises dans l'air suite au **travail du sol**, des **suies** issues de la combustion incomplète des hydrocarbures par les moteurs ou des particules de diverses natures). Les méthodes de production durables, où le travail du sol est réduit (ex. : permaculture) et où la structure grumeleuse du sol résiste mieux à l'érosion éolienne, émettent moins de poussières dans l'air.
- de **polluants chimiques** : des gaz comme le **monoxyde d'azote** (NO), le **dioxyde d'azote** (NO₂), le **méthane**, les **pesticides** ou bien d'autres **composés organiques volatils** ou COV) peuvent être émis en grande quantité dans le cas de l'agriculture

intensive. Mais même dans les systèmes plus archaïques, la combustion du bois et les feux agricoles allumés pour le débroussaillage avant la mise en culture engendrent un ensemble de polluants atmosphériques (dont les hydrocarbures aromatiques polycycliques ou HAP). Les connaissances sur les émissions (quantités, devenir, concentrations limites acceptables) de ces polluants dans l'atmosphère sont partielles et les données variables. En ce qui concerne les pesticides, par exemple, les études sur la contamination de l'air sont récentes (voire en cours) et aucun seuil limite de concentration dans l'air n'existe actuellement.



Figure 1 – Les feux agricoles : une source non négligeable d'émission de polluants dans l'air (source : OMPE – Organisation mondiale pour la protection de l'environnement)

Dans certaines circonstances (ex. : **inversions thermiques**, périodes de forte chaleur), les particules en suspension et les gaz constituent des **cocktails de polluants** dont la concentration et les durées de présence suffisent à produire **un effet toxique et/ou écotoxique**. Ces polluants peuvent aussi interagir avec la lumière (on parle alors de pollution photochimique), en produisant par période de temps chaud et ensoleillé de l'ozone troposphérique⁸ qui est un polluant majeur et provoque notamment des problèmes respiratoires.

L'agriculture participe aux **émissions de composés azotés, de COV, du méthane et des pesticides**, ainsi que **des particules primaires**. Quantitativement, les flux des polluants d'origine agricole peuvent paraître faibles par rapport à d'autres secteurs. Mais, sur des surfaces aussi étendues, les émissions deviennent significatives et diffuses. Selon différentes sources, l'agriculture et la forêt émettent ainsi 53 % du total des particules en suspension (20 % des PM₁₀, 9 % des PM_{2,5} et 6 % des PM₁), 89 % du protoxyde d'azote (N₂O), 76 % du méthane, 10 % des oxydes d'azote (NO_x), 50 % des COV biogènes et 97 % de l'ammoniac présents dans l'air (l'élevage contribuant à hauteur de 77 % des émissions). Les NO_x et COV constituent des **précurseurs d'ozone**. L'ammoniac et les acides sont des **précurseurs de particules fines**. Les particules fines, du fait de leur taille (de l'ordre du micromètre à la centaine de micromètres de diamètre), vont se diffuser au gré des vents, voire pour les nanoparticules de se comporter comme des gaz. Une

8 C'est-à-dire de l'ozone qui se forme dans les basses couches de l'atmosphère.

fois émises (p. ex., lors d'un feu ou lors d'une pulvérisation de pesticide), elles peuvent rester en suspension dans l'air pendant des heures, des jours ou même des mois.

On observe que, tant dans les pays développés que dans les pays en développement :

- les sources d'émission sont multiples en agriculture, mais **les intrants jouent un rôle prépondérant, et ce rôle va croissant** dans les ACP ;
- les émissions dépendent de facteurs souvent indépendants du contrôle de l'agriculteur (météorologie, changement climatique, etc.) ;
- certains facteurs sont **néanmoins** partiellement influençables par l'agriculteur (pratiques adoptées, matériel employé).

En agriculture, **la préparation du sol, la fertilisation, l'apport de produits phytopharmaceutiques, les opérations culturales** vont générer l'émission de particules primaires en fonction du type de sol (plus le sol est dégradé, plus vite il émettra de la poussière) et de la météo (plus le sol est sec, plus il dégagera de poussières ; plus il fait chaud, plus intense sera la volatilisation). La pollution de l'air est aussi indirecte : elle est liée à la présence, à la volatilisation et à l'accumulation (retombées atmosphériques) de polluants du sol (pesticides, engrais, effluents d'élevage, fertilisants). Par la dégradation induite de la fertilité des sols, la pollution de l'air réduit la productivité agricole et pousse à encore plus de dépendance des agriculteurs à l'égard des engrais, notamment azotés (et donc le risque de pollution des sols et des eaux souterraines par les nitrates). Au final, **un véritable cercle vicieux s'installe entre la pollution de l'air et la pollution des sols**. Si l'azote est un élément essentiel pour la croissance des plantes, son utilisation excessive par l'agriculture conventionnelle pose problème.

Pour l'élevage, les émissions de particules peuvent avoir lieu au niveau des bâtiments, du stockage des effluents, de l'épandage d'effluents et en pâturage⁹. Les émissions d'ammoniac provenant de l'agriculture conventionnelle, forte consommatrice d'intrants, et de l'élevage intensif continuent leur progression..., sans compter les dommages causés par les cultures sur brûlis qui génèrent une forte pollution de l'air.

1.2. Effet des incendies accidentels ou volontaires de végétation

Selon la FAO¹⁰, la combustion de la biomasse (« brûlage ») est un phénomène courant et **très répandu dans tout le monde tropical**. Les incendies de végétation, qu'ils soient allumés pour diverses raisons par les populations, ou par la foudre, sont fréquents et couvrent de grandes étendues. Les feux alimentés par le bois, le charbon de bois ou les résidus agricoles sont la principale source d'énergie domestique pour la cuisine et le chauffage. Le feu est aussi utilisé pour éliminer la biomasse lors du défrichage des terres destinées à l'agriculture, ou, après la culture, pour se débarrasser des résidus agricoles indésirables.

L'ensemble de ces feux constitue **une source importante de gaz traces et de particules en suspension** libérés dans l'atmosphère. Les incendies de forêt ont de nombreuses incidences sur l'environnement, et notamment sur la qualité de l'air, donc en finale sur la santé.

⁹ Comment l'agriculture participe à la pollution de l'air », Natura-Sciences, 26 mars 2018.

¹⁰ P.G.H. Frost, *Origines, impacts, effets et maîtrise du feu dans les zones boisées d'Afrique Australe*, Rome, FAO.

Dans une étude réalisée en 2012, l'ANSES (France) a répertorié les principales classes de composés chimiques détectés dans la fumée résultant des incendies de végétation : cette étude précise tout d'abord que la composition des fumées varie selon la nature exacte du combustible, sa densité, l'humidité, les conditions de combustion et l'éloignement de la source. On recense dans les fumées de **très nombreuses substances chimiques**, incluant **le dioxyde de carbone (CO₂)**, **le monoxyde de carbone (CO)**, **des composés organiques volatils et semi-volatils**, **des particules**, **des oxydes d'azote (NO_x)**, et bien d'autres. On estime que la combustion de la biomasse dans le monde entier dégage environ 3 460 Tg C de dioxyde de carbone, 350 Tg C de monoxyde de carbone, 38 Tg C de méthane, 24 Tg C d'hydrocarbures non méthaniques (C₂ - C₁₀), 8,5 Tg d'azote sous forme d'oxyde nitreux (NO), des quantités plus faibles, mais non moins importantes, d'autres gaz traces tels que le chlorure de méthyle, et 104 Tg de particules en suspension (Hao *et al.*, 1990, Andreae, 1991).

Le rapport ANSES insiste surtout sur **deux types de polluants**, compte tenu de l'importance de leurs émissions et de leurs effets sur la santé.

- **Les particules en suspension** : elles représentent le polluant de l'air le plus élevé par rapport aux seuils réglementaires dans les zones impactées par les fumées. Environ **80 % de la masse des fumées sont des particules fines** (diamètre < 2,5 µm). Ces caractéristiques les rendent facilement transportables sur de longues distances pouvant atteindre plusieurs centaines de kilomètres. Les niveaux atteints dans l'air ambiant à court terme (quelques heures à quelques jours) peuvent être particulièrement élevés (plusieurs dizaines à plusieurs centaines de µg/m³). Le rôle des particules en suspension a été montré dans certaines atteintes fonctionnelles respiratoires, le déclenchement de crises d'asthme et la hausse du nombre de décès pour cause cardio-vasculaire ou respiratoire, notamment chez les personnes les plus sensibles.
- **Le monoxyde de carbone (CO) : un gaz incolore et inodore. Il est produit par la combustion incomplète de matières organiques**, et notamment par les incendies de végétation. Les professionnels de lutte contre le feu y sont particulièrement exposés. Les niveaux les plus élevés sont observés durant les phases de combustion lente, en particulier à proximité du feu. Le monoxyde de carbone se fixe à la place de l'oxygène sur l'hémoglobine du sang, conduisant à un manque d'oxygénation du système nerveux, du cœur, des vaisseaux sanguins. Une exposition prolongée peut entraîner un coma, voire la mort.

La fumée des incendies provoquerait la mort de 339 000 personnes par an dans le monde, selon certains chercheurs (problèmes cardiovasculaires et respiratoires), dont 157 000 décès pour la seule Afrique subsaharienne (*Le Monde*, 2012).

On évalue actuellement la quantité de biomasse brûlée chaque année à 6 230-8 700 Tg ms an⁻¹, dont environ 87 % sous les tropiques. Sur ces derniers, près de la moitié (49 %) est attribuée aux feux de savanes, comprenant à la fois les incendies et les feux liés à l'utilisation des terres. Le reste correspond à la combustion du bois de feu, des résidus agricoles et des abattis de déforestation, en proportions à peu près égales. Pour les tropiques, on estime que 42 % des émissions sont dues à l'Afrique.

La FAO considère que la combustion de la biomasse contribue de façon importante aux émissions de **gaz à effet de serre (CO₂ libéré)** et aux précurseurs de l'ozone troposphérique.

L'étude de l'ANSES conclut que les polluants composant les fumées des incendies de végétation peuvent se déposer, se distribuer et subir des modifications chimiques **au niveau du sol et des plans d'eau. La qualité des nappes phréatiques** est donc mise en jeu par ces incendies.

Le tableau suivant fournit des évaluations de la quantité de biomasse brûlée chaque année par les feux de savane, dans le monde entier et en Afrique.

Tableau 1 – Évaluation de la quantité de biomasse brûlée chaque année par les feux de savane (Tg MS an⁻¹)

Afrique australe	Afrique de l'Ouest	Afrique	Monde
			1 190
			600-3 200
1 200	1 228	2 428	3 691
			3 690
	90-480	1 294	
		2 520	
		1 300-2 500	2 500-3 700
561-1 743 (213-2 812)			
177 (90-264)			

Le tableau suivant montre la part des émissions dues à ces incendies dans les émissions totales à l'échelon mondial. Il faut remarquer que les évaluations de la quantité de biomasse brûlée varient grandement, et le calcul des émissions est donc entaché d'une grande incertitude.

Tableau 2 – Comparaison des valeurs mondiales estimées des émissions dues au brûlage de la biomasse, et de l'ensemble des émissions toutes sources confondues, brûlage de la biomasse inclus (source : Andreae, 1991)

Composés chimiques	Émissions (Tg élément an-1)		Part du brûlage de la biomasse (%)
	Brûlage de la biomasse	Toutes sources	
Dioxyde de carbone (brut)	3 460	8 700	40
Dioxyde de carbone (net) ¹	1 800	7 000	26
Monoxyde de carbone	350	1 100	32
Méthane	38	380	10
Hydrocarbures non méthaniques ²	24	100	24
Oxyde nitreux	8,5	40	21
Chlorure de méthyle	0,5	2,3	22
Matière particulaire totale	104	1530	7
Carbone organique particulaire	69	180	39
Carbone élémentaire (suie noire)	19	<22	>86

¹ Les émissions nettes de CO₂ sont égales aux émissions brutes moins la quantité réabsorbée par les plantes en phase de repousse

² Isoprènes et terpènes exclus

Les gaz traces dégagés par les incendies contribuent à la fois à l'effet de serre et à la réactivité chimique de l'atmosphère.

Les feux de savane en Afrique sont considérés comme la cause principale du pic annuel prononcé d'ozone troposphérique qui s'étend sur tout l'océan Atlantique, de l'Afrique à l'Amérique du Sud, en septembre-octobre (Fishman *et al.*, 1991). La combustion de la biomasse produit aussi de grandes quantités de particules, de taille inférieure au micron, qui restent en suspens dans l'atmosphère pendant de longues périodes, réduisant la qualité de l'air et la visibilité. Ce problème est aggravé en Afrique australe par l'atmosphère relativement stable pendant la saison sèche, qui permet le développement de fortes inversions thermiques, piégeant ainsi les particules dans les couches inférieures de l'atmosphère. Ceci est encore aggravé par la présence d'un grand mouvement giratoire atmosphérique subcontinental qui provoque la recirculation d'une grande partie de ces émissions autour de l'Afrique australe pendant la saison sèche (Garstang *et al.*, 1996).

Ces effets négatifs sont **à mettre en balance avec les avantages apparents du brûlage** de la végétation, tels qu'ils sont perçus par les populations. Ces avantages comprennent notamment : le regain des herbacées après les incendies dans certains milieux, utilisé par les éleveurs pour augmenter la ration protéique de leur bétail ; le contrôle de la progression de la brousse, permettant éventuellement d'augmenter les rendements des pâturages pour le bétail ; le nettoyage des chemins entre les lieux d'habitation, facilitant la détection des prédateurs et autres animaux dangereux ; et le contrôle de parasites tels que les tiques (*Acaridae*). Les incendies de végétation peuvent aussi être provoqués par une mauvaise maîtrise du feu utilisé pour le défrichement et la préparation des parcelles pour les cultures, par le brûlage de pare-feu, par la fabrication de charbon de bois, par l'enfumage des abeilles lors de la récolte du miel, et par le brûlage de certaines zones pour rabattre le gibier de chasse (Trapnell, 1959 ; Kikula, 1986).

1.3. Rôle des intrants agricoles dans la pollution atmosphérique

En l'espace d'un peu plus d'un demi-siècle, l'agriculture a été le témoin de nombreuses évolutions. Outre les avancées technologiques – sélection de variétés à haut rendement, irrigation, mécanisation, amélioration des techniques de conservation – l'utilisation des « **intrants** » (matières fertilisantes et produits phytopharmaceutiques) a également largement contribué à la progression des rendements et de la rentabilité de la production. Pour favoriser la pousse des plantes et maximiser les récoltes, les agriculteurs utilisent donc en masse des **engrais azotés**, des **pesticides**, **mécanisent le travail du sol** et appliquent une irrigation lourde qui nécessitent de modifier la topographie de grandes zones de culture.

Les matières fertilisantes apportent aux plantes les éléments nutritifs dont elles ont besoin pour se développer et qui peuvent manquer dans les sols trop peu fertiles ou trop exploités. Les traitements phytopharmaceutiques permettent de réduire la concurrence des adventices ou de limiter les dégâts causés aux cultures et aux produits récoltés par des ravageurs, des virus, des champignons ou des bactéries pathogènes. Le problème est que les plantes absorbent seulement la moitié de ces engrais, et qu'une fraction minime des pesticides atteint réellement la cible. **Le reste finit donc dans l'atmosphère, le sol et l'eau, polluant les rivières et endommageant la biodiversité aquatique.** Les intrants qui sont répandus à grande échelle dans l'environnement **peuvent s'introduire**

dans l'atmosphère : directement lors de l'application, ou **indirectement** en s'y diffusant par les phénomènes d'érosion éolienne ou encore de vaporisation de leurs dépôts sur les zones traitées. On sait, par exemple, que les dépôts phytopharmaceutiques sur les plantes ou le sol peuvent, par des processus complexes, repasser en phase gazeuse dans l'air.

Les intrants agricoles présentent de ce fait de **nombreuses externalités négatives** qui menacent les populations humaines et mettent à mal l'équilibre des écosystèmes:

- **Les matières fertilisantes** (engrais organiques ou chimiques) **peuvent être source de pollution** de l'air, par volatilisation, et surtout des eaux, quand ils sont appliqués en quantité supérieure à ce que les cultures et le sol peuvent absorber. L'excès d'azote et de phosphates peut être lessivé dans les eaux souterraines ou s'écouler par ruissellement dans les eaux de surface. Cette surcharge d'éléments nutritifs au niveau des lacs, réservoirs et mares, provoque une prolifération d'algues qui détruisent la faune et la flore aquatique (phénomène d'eutrophisation). Par ailleurs, l'épandage de fertilisants sur les sols agricoles est responsable de plus de 30 % des émissions d'oxyde nitreux.
- **Les produits phytopharmaceutiques** sont pointés du doigt comme une cause possible du déclin des colonies d'abeilles et autres pollinisateurs, et de la biodiversité en général. Il est un fait reconnu que certains produits phytopharmaceutiques portent atteinte à la santé des applicateurs, des ouvriers qui entrent en contact avec les dépôts résiduels, et des consommateurs exposés aux résidus dans leur alimentation (ex. : **effets sur le système nerveux, sur le patrimoine génétique et, pour les substances qui ont des effets de perturbateurs endocriniens, sur l'équilibre hormonal de l'être humain**).

Des études ont mis en évidence que les polluants présents dans le sol influent négativement sur la croissance des cultures légumières, en réduisant leur capacité à capturer et fixer l'azote, un processus essentiel pour un bon développement et un bon rendement. Dans le même temps, les travaux aratoires fragilisent encore la structure du sol.

2. POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE PAR LES MATIÈRES FERTILISANTES

2.1. Origine de la pollution de l'air par les matières fertilisantes

Certains sols du fait de leur structure et de leur composition (fraction argilo-humique, présence de microorganismes, aération...) sont naturellement plus fertiles que d'autres. Lorsqu'ils supportent des cultures intensives, ces sols finissent par s'appauvrir si aucune « restitution » n'est opérée. C'est la raison pour laquelle l'agriculteur a recours à diverses techniques pour maintenir la fertilité de ses sols, dont le recours à des matières fertilisantes¹¹ qui apportent, sous diverses formes, les nutriments (N, P, K, oligo-éléments) absents ou épuisés par les cultures.

Parmi les matières fertilisantes, on distinguera les **engrais organiques** et les **engrais chimiques** obtenus par mélange ou synthèse.

Parmi les engrais organiques, les lisiers (déjections solides et liquides du bétail), les fumiers (lisier + paille) et les purins (macérât du fumier) sont des sources très intéressantes et très appréciées de matière organique, même s'il convient de bien les utiliser pour éviter de nuire à l'environnement. Cependant, sans élevage, ils ne sont pas disponibles localement. Or, la fermentation entérique des bovins (pour environ 45 % du total) et la gestion des déjections porcines (pour environ 20 %) sont responsables de l'émission de méthane (CH_4). Les ruminants, particulièrement, possèdent trois compartiments digestifs pré-gastriques, parmi lesquels le rumen est à la base de la digestion microbienne des plantes fourragères. Le méthane est un produit secondaire de la digestion qui est expiré ou éructé par l'animal (vaches, moutons, chèvres...). Il peut également provenir du fumier et des lisiers composés d'excréments de ces animaux. L'obtention comme l'utilisation de ce type de matières fertilisantes organiques, nécessaires au sol, génèrent donc une pollution atmosphérique par le méthane libéré.

Parmi les engrais chimiques (de synthèse), on distinguera trois familles :

- **les engrais azotés** : l'azote est un élément présent naturellement dans l'atmosphère et très important pour le développement végétatif des parties aériennes des **végétaux** ;
- **les engrais potassiques** : la potasse stimule la floraison et le développement des fruits. Elle est naturellement présente dans les sols ;
- **les engrais phosphatés** : ils apportent à la terre du phosphore qui *booste* le développement racinaire et renforce la résistance des plantes. Ces engrais peuvent aussi être formulés avec de l'azote (phosphate d'ammonium) ou encore de l'aluminium (phosphate d'aluminium).

Nous présenterons plus en détail ci-dessous les mécanismes qui expliquent la pollution atmosphérique par l'azote ammoniacal et l'oxyde nitreux, car ce sont essentiellement les engrais azotés qui polluent l'atmosphère.

- La pollution **azotée** en agriculture prend principalement la forme d'oxyde nitreux (N_2O), d'ammoniac (NH_3) et de nitrates (NO_3). Le surplus d'azote est redistribué sous différentes formes, dans l'eau, mais aussi **dans l'air**.

11 Il convient de distinguer les amendements, des matières fertilisantes (engrais organiques ou chimiques). Les amendements contribuent à l'amélioration des qualités structurales et chimiques du sol (ex. : amendements calcaires et magnésiens, composts...).

- La **volatilisation** de l'oxyde nitreux (ou protoxyde d'azote) et de l'ammoniac constitue la voie principale de perte d'azote **lors de l'épandage d'effluents d'élevage** (lisier, fumier...) **ou d'engrais riches en ammonium comme l'urée** – $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ – **ou l'ammonitrate** (engrais azoté minéral à base de nitrate d'ammonium, NH_4NO_3). Pour comprendre les processus de transfert de l'azote nitreux ou ammoniacal dans l'atmosphère, il convient d'assimiler l'ensemble des réactions physico-chimiques de formation/destruction de l'azote dans la biosphère.
- Le cycle de l'azote comprend **trois réservoirs** : l'azote organique (humus...), l'azote minéral (NO_2^- ...) et l'azote gazeux (N_2 , N_2O ...).

Trois processus de base sont impliqués dans le recyclage de l'azote (voir figure 2).

- La conversion bactérienne du diazote atmosphérique (N_2) en azote assimilable (NH_4^+) par les plantes et les animaux. Le NH_4^+ adsorbé sur le complexe argilo-humique ou en solution dans le sol est le plus souvent transformé en NH_3 (ammoniac).
- La nitrification qui transforme les produits de la fixation (NH_4^+ , NH_3) en NOx (ex. : nitrates, NO_3^-) dans des sols pauvres en oxygène (O_2) :

Nitrification : NH_4^+ (nitrosomas) \leftrightarrow NO_2^- (nitrobacter) \leftrightarrow NO_3^- (nitrates)

- La dénitrification qui retourne l'azote à l'atmosphère sous sa forme moléculaire N_2 , avec comme produit secondaire du CO_2 et de l'oxyde nitreux N_2O . Ce sont des bactéries « dénitrifiantes », qui opèrent en réduisant l'ion nitrate NO_3^- facilement soluble dans la solution du sol grâce aux liaisons hydrogène qu'il établit avec les molécules d'eau et facilement absorbable par les végétaux, en ion nitrite NO_2^- , puis en monoxyde d'azote NO , après en N_2O (oxyde nitreux) et enfin en diazote N_2 , qui va s'échapper du sol par volatilisation, pour rejoindre l'atmosphère.

Dénitrification : $\text{NO}_3^- \leftrightarrow \text{N}_2\text{O} / \text{N}_2$ (oxyde nitreux / diazote)

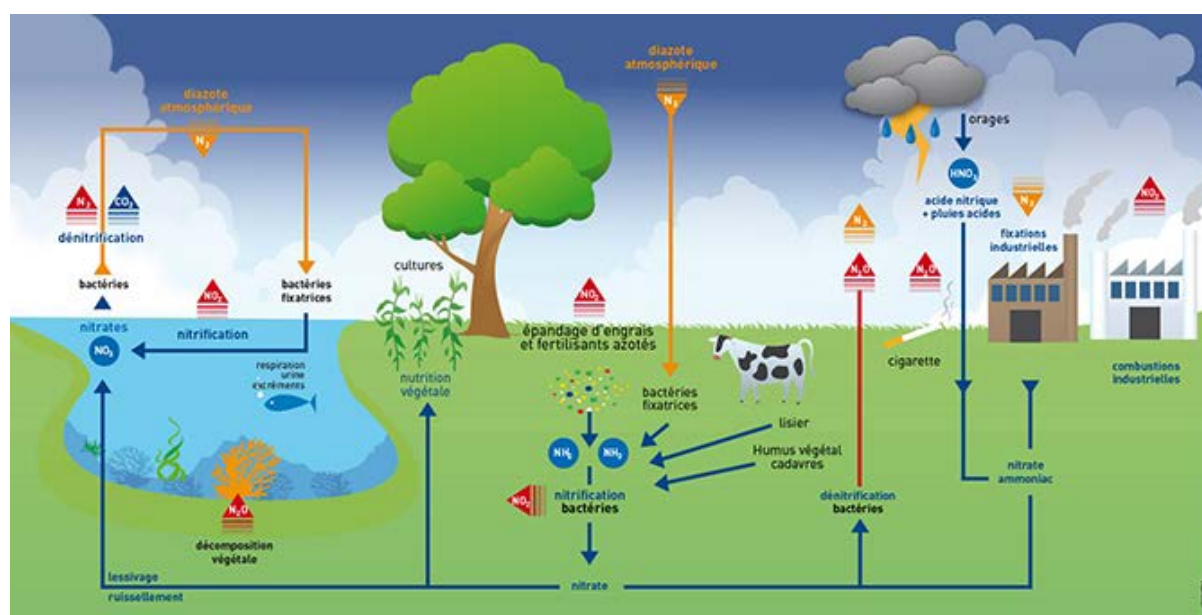


Figure 2 – Le cycle de l'azote : explication des diverses émissions dans l'atmosphère

Ces processus sont néanmoins très lents et l'apport excessif d'engrais azotés et d'effluents agricoles limitent les processus d'assimilation de l'ammonium NH_4^+ , de l'ammoniac NH_3 et des nitrates NO_3^- (formes d'ionisation les plus communes des fertilisants azotés).

Cependant, dans la volatilisation de l'azote ammoniacal (comme, rappelons-le, dans la libération du méthane), **l'élevage joue un rôle prépondérant** (pendant la production, au moment du stockage puis lors de l'épandage des effluents).

Près de la moitié des émissions d'ammoniac des exploitations porcines, bovines et de volailles sont produites **dans les bâtiments d'élevage**. En effet, lorsqu'une vache urine en pâture, l'urée et l'acide urique s'infiltrent rapidement dans le sol, avant que ces produits ne s'hydrolysent en libérant de l'ammoniac, retenu par le complexe argilo-humique du sol. Au contraire, lorsqu'une vache urine sur du béton, il n'y a évidemment pas d'infiltration, et **une partie importante de l'azote excrété se trouve rapidement volatilisé**, d'autant plus que l'urine se trouve mélangée aux bouses qui contiennent des uréases, enzymes catalysant l'hydrolyse de l'urée en ammoniac et CO_2 .

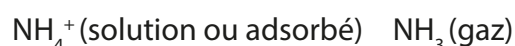
Le **stockage des effluents** d'élevage avant leur épandage favorise le contact des déjections avec l'air libre.

Enfin, **l'épandage des effluents d'élevage génère plus du tiers des émissions totales d'ammoniac**. L'ammoniac est émis par le sol ou les plantes à partir de l'ammonium. L'azote ammoniacal est en effet la forme obtenue après minéralisation complète des composés organiques azotés dans le sol.

La présence d'azote ammoniacal dans une solution en contact avec l'air conduit systématiquement à la volatilisation d'ammoniac du fait d'un simple changement de phase :



ou



L'intensité du processus de volatilisation, au cours de l'épandage, va dépendre des caractéristiques du sol, des conditions extérieures (température, humidité...), de la formulation du produit (tableau 1) ou encore du mode d'épandage.

Tableau 3 – Pertes par volatilisation en NH_3 dans l'atmosphère lors de l'épandage de différents engrais azotés (source : Aspa, 2015)

Types d'engrais	Pertes de $\text{NH}_3\text{-N}$ (kg/kg de N épandu)
Ammonitrates	0,015
Sulfate d'ammonium	0,200
Urée	0,170
Ammoniac	0,120
Engrais NP,NK,NPK	0,015

L'ammoniac, par son caractère acido-basique va interagir avec des composés acides présents dans l'atmosphère (ex. : H_2SO_4 ou HNO_3) pour former des **aérosols secondaires** de sels d'ammonium – $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ou NH_4NO_3 . Une faible fraction peut être oxydée en

NO_x en présence de radicaux hydroxyles pouvant alors conduire à la **production d'ozone** troposphérique (entre le sol et 12 km d'altitude). Oxydant puissant, l'ozone agit sur les processus physiologiques des végétaux, notamment sur la photosynthèse, **ce qui provoque des baisses de production des cultures** et des forêts.

Dans les tout premiers kilomètres, le processus dominant est le **dépôt sec des aérosols** ou de l'ammoniac à proximité des sources. Ammoniac et sels d'ammonium peuvent aussi être transportés sur de longues distances selon les conditions climatiques (jusqu'à quelques centaines de kilomètres) et déposés lors des dépôts humides (pluies, brouillards...). Cet azote ainsi déposé rentre dans le cycle de l'azote de l'écosystème sur lequel a eu lieu le dépôt.

Le dépôt d'ammoniac ou d'ammonium induit aussi une **intensification de la nitrification dans les sols (acidification des sols)**. Un certain nombre d'écosystèmes terrestres naturels ou semi-naturels sont très sensibles aux dépôts azotés. Cet effet d'eutrophisation peut conduire localement à des **pertes de biodiversité de la flore et de la faune**.

Tous les sols émettent de l'oxyde nitreux, mais les sols agricoles en dégagent davantage. Il provient essentiellement de deux processus microbiens du sol : la nitrification (milieu semi-aride) et la dénitrification (sous irrigation ou milieu humide). Lors de la dénitrification, N_2O est un produit intermédiaire obligatoire, qui peut être émis si la dénitrification ne va pas jusqu'au produit final N_2 . En revanche, pour ce qui est de la nitrification, N_2O est un produit secondaire.

Les émissions d'oxyde nitreux dépendent en majeure partie des caractéristiques du sol, telles que l'alimentation en oxygène, le *pool* de nitrates et de carbone disponible, la température ou encore le pH du sol. Lorsque la quantité du carbone dans le sol est élevée (ex. : incorporation de résidus de cultures), l'alimentation du sol en oxygène s'en trouve réduite. Le N_2O participe uniquement aux réactions photochimiques au niveau de la stratosphère (12 à 50 km d'altitude).

2.2. Dispersion dans l'air des polluants générés par les matières fertilisantes

Si l'on prend comme repère les valeurs plus strictes de l'OMS, **plus de 80 % de la population urbaine de l'UE est exposée** à des concentrations excessives de PM_{10} (on manque malheureusement de chiffres pour les grandes métropoles des pays ACP, mais vu l'état du parc automobile, la situation serait comparable, malgré l'absence d'appareils de chauffage). Cela s'explique par le fait que certains polluants peuvent **rester dans l'atmosphère assez longtemps pour être transportés** d'un pays à l'autre, **d'un continent à l'autre** ou, dans certains cas, pour circuler autour du globe.

Le transport intercontinental des particules et de leurs précurseurs peut expliquer en partie pourquoi l'amélioration de la qualité de l'air en Europe n'est pas proportionnelle à la diminution des émissions de particules et de précurseurs de particules. Les émissions de précurseurs de particules ont globalement diminué dans l'UE : -54 % pour les oxydes de soufre (-44 % dans les 32 pays de l'AEE) ; -26 % pour les oxydes d'azote (-23 % dans les 32 pays de l'AEE) ; -10 % pour l'ammoniac (-8 % dans les 32 pays de l'AEE).

Mais **ces réductions d'émissions ne se traduisent pas toujours par une plus faible exposition aux particules**. La proportion de la population urbaine européenne exposée à des niveaux de concentration de PM_{10} supérieurs aux valeurs fixées par la législation

de l'UE reste élevée (1841 % pour l'EU-15 et 23-41 % pour les 32 pays de l'AEE). Elle n'a que faiblement baissé au cours de la dernière décennie. Malgré tout, entre 2001 et 2010, les émissions directes de PM_{10} et de $PM_{2.5}$ ont diminué de 14 % dans l'UE et de 15 % dans les 32 pays membres de l'AEE.

Une des difficultés dans la prévision à court terme (quelques jours) de l'évolution des seuils de pollution est due à la **méconnaissance des sources d'ammoniac** liées aux activités agricoles et à l'élevage. **L'ammoniac** est en effet **le plus mal connu des polluants** régulés par les directives européennes pour la qualité de l'air : ses cadastres d'émission sont peu précis et sa surveillance globale et systématique est difficile. L'ammoniac fait aujourd'hui l'objet d'une surveillance dans l'atmosphère. À forte concentration, l'ammoniac (NH_3 , un gaz malodorant et irritant) engendre une cascade d'effets environnementaux. Il se dépose sur les surfaces, et son évolution chimique dans les sols et l'eau, outre un effet acidifiant, peut conduire, par excès de matière azotée, à des phénomènes d'eutrophisation. La détermination sélective de l'ammoniac dans l'atmosphère apparaît d'un grand intérêt pour satisfaire à plusieurs objectifs :

- quantifier sur le long terme les variations temporelles et spatiales des concentrations en ammoniac, permettant ainsi de vérifier l'efficacité des mesures de réductions engagées à l'échelle locale et européenne ;
- qualifier et quantifier le rôle de l'ammoniac sur la formation de particules fines en suspension (l'ammoniac est un précurseur du nitrate et sulfate d'ammonium).

Grâce à des mesures par satellite¹², les chercheurs ont pu suivre pendant une année d'observation en continu des cartes de concentration en ammoniac dans l'air et les comparer aux modèles atmosphériques récents. Ces travaux ont mis en évidence une sous-estimation des sources d'ammoniac fournies par les inventaires actuels dans des vallées agricoles de l'hémisphère Nord, (Amérique et en Europe). Un réseau¹³ réalise depuis 1986, des mesures de concentrations en ammoniac dans 23 pays européens. On observe, sur la période 1990-2003, une tendance décroissante des émissions de NH_3 particulièrement marquée dans les pays de l'Est. La Lituanie voit ses émissions diminuer de 60 %, la Bulgarie de 58 %, alors que l'Espagne connaît une hausse de 20 % sur la même période.

On constate que les concentrations en ammoniac présentent des **variations saisonnières notables** qui diffèrent en fonction de la source d'émission principale. En zone rurale, éloignée des sources, les concentrations en ammoniac sont plus importantes en été. À l'inverse, si ces zones sont des zones d'élevage, les concentrations maximales en ammoniac coïncident avec les périodes d'épandage. Ainsi, différentes périodes de l'année peuvent être influencées en fonction des types de culture associées : les prairies, pic à la fin de l'hiver ou au début du printemps, et les cultures céréalières, pic à la fin de l'automne.

12 Mesures infrarouges par le satellite IASI du Centre national d'étude spatiale (CNES) et de l'*European Meteorological Satellites* (Eumetsat), une organisation intergouvernementale fondée en 1986.

13 EMEP (*European Monitoring and Evaluation Programme*) qui dispose de 71 sites de mesures.

3. POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE PAR LES PRODUITS PHYTOPHARMACEUTIQUES

3.1. Origine de la pollution de l'air par les produits phytopharmaceutiques

L'agriculture fait un usage important de **produits phytopharmaceutiques** (appelés plus communément « **pesticides** ») avec un risque lié au rejet de leurs principes actifs dans l'environnement (air, sol et eaux). On estime que près de 25 à 75 % de la bouillie pulvérisée ne se déposent pas sur les cibles.

Jusqu'à présent, la pollution par les pesticides est essentiellement perçue au travers de leur présence dans les eaux de surface et les eaux souterraines¹⁴ (celles qui servent en priorité à l'alimentation), le sol et les denrées alimentaires. **L'atmosphère joue cependant un rôle primordial dans la dissémination des pesticides à l'échelle locale, régionale et globale**, mais, faute de mesures de la présence des pesticides dans l'air et des conséquences potentielles de celle-ci, cette contamination diffuse est passée inaperçue et a été longtemps sous-estimée.

Ainsi, la législation relative à la qualité de l'air ambiant, établie au niveau national ou européen, ne fixe **pas de valeurs limites** pour les résidus atmosphériques de pesticides, alors que c'est le cas pour d'autres polluants, comme l'oxyde nitreux, le dioxyde de soufre ou les particules fines. Actuellement, les études sur les polluants atmosphériques phytopharmaceutiques se multiplient à l'échelle locale dans les pôles urbains et zones à forte dominante agricole. Des associations agréées de surveillance de la qualité de l'air dressent des listes régionales de molécules à surveiller et tentent de **fixer des valeurs guides** pour les substances actives et leurs dérivés dans le cadre d'études d'exposition de la population générale et de l'environnement.

L'application des pesticides au champ peut se faire de plusieurs manières, mais c'est le plus souvent **par pulvérisation de gouttelettes** sur les plantes (insecticides et fongicides surtout) ou sur le sol (herbicides surtout). Au cours de cette opération, plusieurs voies de contamination de l'atmosphère sont possibles qui mettent en œuvre des mécanismes différents :

- une **contamination directe** pendant l'application à cause des pertes **par dérive** (perte par transfert vertical et horizontal d'une partie de la bouillie pulvérisée dans l'atmosphère) ;
- une **contamination indirecte en post-application** soit **par volatilisation** depuis le sol ou le couvert traité, soit **par érosion éolienne**.

Aussi, pour expliquer la présence de pesticides dans l'air, entrent en jeu plusieurs **phénomènes** (ex. : dérive, volatilisation, érosion...), diverses **propriétés physico-chimiques** (ex. : le partage entre les phases gazeuse-aqueuse-solide, la persistance de la substance active dans l'air...) ainsi que l'influence des **techniques d'application** employées (ex. : appareil, volume/ha, taille des gouttes, pression de travail, type de buse...) et des **circonstances météorologiques** (ex. : température de l'air, humidité relative, vitesse du vent...).

14 La concentration maximale admissible pour les pesticides dans l'eau distribuée au robinet est de 0,1 µg/litre et par pesticide et de 0,5 µg/litre pour la somme de tous les pesticides détectés dans l'eau) selon la réglementation européenne (directive 98/83/CE).

Les transferts atmosphériques **peuvent s'effectuer sur de longues périodes**, ce qui explique la persistance de certains pesticides dans l'air en dehors des périodes d'épandages. Le processus global résulte d'un **déplacement d'équilibre** entre les phases liquide ou solide et la phase gazeuse. De nombreux paramètres et interactions rentrent en compte dans la volatilisation au moment de l'épandage et après traitement, rendant complexe la détermination des conditions d'un tel processus de transfert. Selon leur mode de transfert, les pesticides se retrouvent dans l'atmosphère sous trois formes : gazeuse, liquide ou solide (particulaire).

Tableau 4 – Phase des pesticides selon le mode de transfert dans l'air

Mode de transfert dans l'air	Phase des pesticides
Dérive	Liquide
Érosion éolienne	Solide (particulaire)
Volatilisation	Gazeuse

Une fois dans l'air, les pesticides peuvent passer d'une phase à l'autre au gré des caractéristiques physico-chimiques et des conditions météorologiques. Les différents états ont une importance, en particulier pour le transport à plus ou moins grande distance.

3.2. Contamination de l'atmosphère par la dérive lors de l'application

L'efficacité d'un traitement phytosanitaire impose une répartition uniforme de la bouillie sur la zone traitée. La qualité de la répartition dépend en grande partie de la **qualité du matériel employé**, mais aussi des compétences de son utilisateur (capacité à bien régler les paramètres : type de buse, pression, vitesse d'avancement, etc. afin d'obtenir le volume de bouillie souhaité à l'hectare).

S'il existe de nombreux systèmes de pulvérisation, **la pulvérisation par rampe de buses à pression de liquide** est, au plan mondial, la technique la plus couramment utilisée. Elle est en effet la mieux adaptée à l'application, par voie liquide, des composés agrochimiques dans toute la gamme des volumes/ha et pour un grand nombre de cultures.



Figure 3 – Pulvérisation par rampe de buses à pression de liquide : la dérive des gouttes derrière la rampe est visible (photo : B. Schiffers)

Même si ces grands appareils sont de plus en plus nombreux dans les pays ACP, peu de petits paysans sont à même de se payer un tel matériel qui serait en outre disproportionné par rapport aux surfaces qu'ils cultivent. Beaucoup de maraîchers disposent, au mieux, d'un **pulvérisateur à dos** (avec une lance et une buse à fente) à pression entretenue par l'action d'un levier, quelquefois d'une canne centrifuge (dans ce cas, la dispersion est assurée par la rotation d'un disque à haute vitesse sur lequel tombe par gravité la veine liquide ; ce type d'appareil est surtout utilisé pour le traitement des cotonniers). Parfois, c'est une simple bouteille en plastique, pressée à la main et dont le bouchon a été percé de trous, qui sert de « pulvérisateur » avec une piètre efficacité. Pour quelques-uns, l'épandage est réalisé avec un balai ou une branche trempée dans la bouillie.

La buse élémentaire à pression de liquide comporte un orifice calibré soumis en amont à une pression de liquide telle que celui-ci est forcé de franchir l'orifice à vitesse élevée. Ce rétrécissement provoque des **perturbations du régime d'écoulement** de la veine liquide lors de son passage dans l'orifice (frottements, turbulences...), puis à sa sortie lorsqu'elle entre en contact avec l'air ambiant. Les herbicides sont en général appliqués au sol, alors que les insecticides et les fongicides sont dirigés vers les parties aériennes des plantes cultivées. Ces perturbations sont à l'origine de **la division du liquide en gouttelettes plus ou moins régulières**.

■ Origine du phénomène et définition de la dérive

Lors d'une pulvérisation, la bouillie se retrouve divisée en **différentes fractions**. La somme de ces fractions représente l'entière de la bouillie pulvérisée. Ces fractions se retrouvent sur les plantes et le sol dans le champ pulvérisé, sur les plantes et le sol aux alentours du champ, dans l'air et une fraction est manquante. Un phénomène de volatilisation survient pendant la pulvérisation et favorise la perte d'une fraction de la bouillie (figure 4). **La dérive de pulvérisation** est un transport atmosphérique de très petites gouttelettes ou de vapeurs de pesticides **hors de la zone traitée** sous l'effet du vent qui se produit au moment même de l'application ou peu de temps après. On l'exprime **en % de la quantité appliquée par hectare** (la dérive est de quelques % habituellement)¹⁵. Dans certains cas extrêmes, la fraction manquante peut représenter près de 30 % du total de la bouillie épandue.

La répartition entre ces différentes fractions varie en fonctions de plusieurs paramètres :

- conditions météorologiques (température, humidité relative, vitesse du vent) ;
- type de pulvérisateur utilisé (taille des gouttes générées) ;
- paramètres de pulvérisation (vitesse, pression, type de buse, produit pulvérisé...).

Une partie de la dérive se dépose habituellement à proximité du point d'application (dérive sédimentaire), mais **une autre partie subsiste plus longtemps dans l'atmosphère et peut être transportée sur de plus longues distances (dérive éolienne)**. C'est pourquoi, en fonction de leur écotoxicité, une distance doit être respectée entre la dernière buse d'une rampe de pulvérisation et un cours d'eau (la zone tampon ou zone non traitée) afin de le préserver d'une contamination exagérée¹⁶.

15 La dérive est exprimée en pourcentage de la masse totale pulvérisée par unité de surface traitée (EFSA 2014).

16 Voir aussi le Manuel 9 du COLEACP/PIP, *La protection et la conservation des eaux*, Chapitre 4.

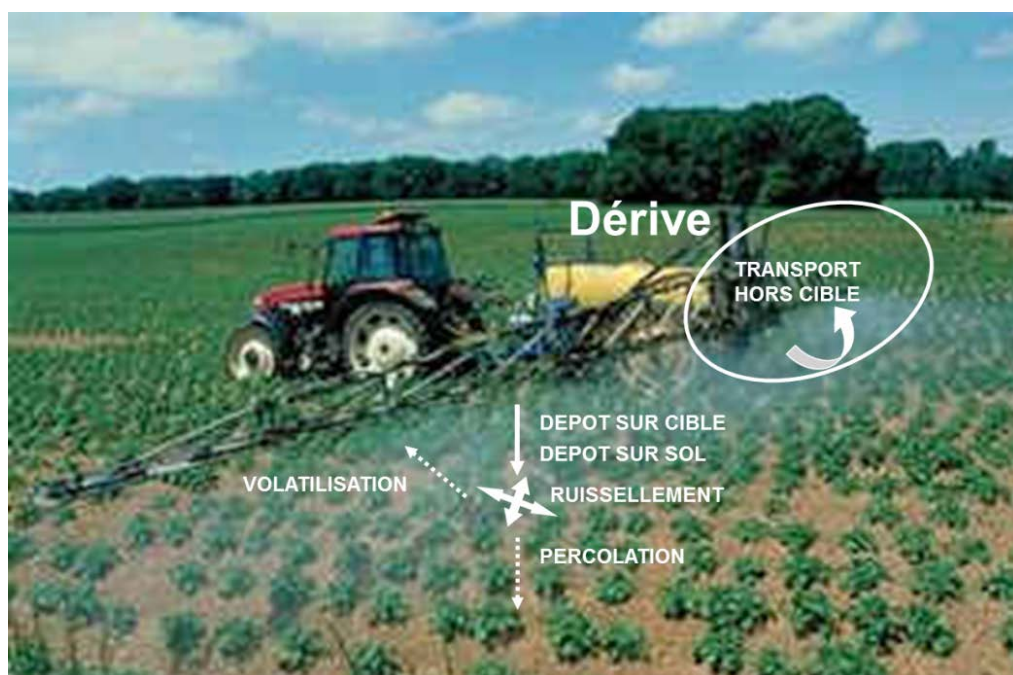


Figure 4 – La figure indique l'ensemble des phénomènes qui peuvent survenir lors de l'application : volatilisation, interception et dépôt sur les végétaux, ruissellement au sol et percolation dans le profil, et pour une partie du volume appliqué, transport hors de la zone ciblée par le vent (ou « dérive »).

Une « **dérive indirecte** » existe également, due aux pertes de pesticide après application, par érosion du sol ou volatilisation à partir du sol et des plantes. En fonction de leurs propriétés physico-chimiques, certaines substances actives sont retenues (adsorbées) par des particules de sol (sur le CAH ou complexe argilo-humique), ce qui influence la volatilisation ou la remise en suspension de ces derniers, dans l'air par le vent. Les substances, les formulations (ex. : granulés ou poudres de type DP ou WP) présentes à la surface du sol ou encore les particules de sol sur lesquels des substances sont adsorbées, peuvent subir l'érosion éolienne et être entraînées au loin. La fraction de bouillie épandue concernée par ce type d'érosion est incertaine (selon certains auteurs, elle varierait de 1 à 7 % de la bouillie).

■ Facteurs influençant la dérive

De nombreux facteurs influencent l'importance de la dérive. Certains facteurs sont mécaniques (ex. : pression de travail ou le type de buse utilisé), d'autres dépendent de la pratique de l'agriculteur (ex. : la hauteur de la rampe, la vitesse d'avancement, le volume de bouillie par hectare), mais les plus importants sont certainement ceux liés à la taille des gouttes et aux conditions atmosphériques, comme la vitesse et la direction du vent pendant l'application ou la température et l'humidité relative de l'air.

a) Influence de la taille des gouttes sur la dérive

La taille des gouttes joue un rôle important au niveau de **la répartition et de la couverture** de la culture, donc de l'efficacité du pesticide appliqué. Lors d'une pulvérisation des gouttes de tailles différentes sont formées. Pour caractériser la taille des gouttes le **diamètre volumétrique médian (VMD)** est le paramètre le plus souvent utilisé. Sur base

du VMD, un standard de classification de la taille des gouttes, accompagnée d'un code couleur des buses, a été défini par *The American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE S572.1)*. Il est communément utilisé dans le monde agricole, par exemple, pour les buses TEEJET Technologies. Le tableau 5 reprend les catégories de tailles de gouttes, le code couleur des buses ainsi que le volume médian des gouttes (défini par ASABE S572.1)

Tableau 5 – Classification de la taille des gouttes selon le standard ASABE S572.1

(source : TEEJET Technologies)

Catégorie	Symbole	Code couleur	VMD (µm)
Extrêmement fin		Mauve	<60
Très fin	VF	Rouge	61-105
Fin	F	Orange	106-235
Moyen	M	Jaune	236-340
Gros	C	Bleu	341-403
Très gros	VC	Vert	404-502
Extrêmement gros	XC	Blanc	503-665
Ultra gros		Noir	>665

Le comportement d'une goutte dans l'air (lâchée sans vitesse initiale) peut être décrit par la loi de Stokes :

$$v = \frac{g d^2 p_d}{18\eta}$$

v : vitesse constante de la goutte à l'équilibre (m/s)

d : diamètre de la goutte (m)

g : accélération de la pesanteur (m/s²)

p_d : masse volumique de la goutte (kg/m³)

η : viscosité de l'air (Ns/m²)

On remarque que **la vitesse de chute est fortement corrélée avec le diamètre de la goutte**.

Tableau 6 – Temps de chute des gouttelettes dans l'air en fonction de leur dimension (source : www.ianr.unl.edu/pubs.pesticides/g1001.htm)

Diamètre des gouttelettes (en µm)	Temps de chute
1	28 heures
10	17 minutes
100	11 secondes
200	4 secondes
400	2 secondes

Les plus grosses gouttes ($> 100\text{-}150\text{ }\mu\text{m}$) subissent fortement l'influence de la force gravitationnelle et par conséquent tombent suivant les lois classiques de la balistique. Par contre, les plus petites gouttes restent plus facilement dans l'air ambiant et subissent l'effet des turbulences et des conditions météorologiques, ce qui modifie leur trajectoire théorique. Les **distances** auxquelles ces petites gouttes peuvent être transportées peuvent être importantes, allant **de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres**.

La dérive augmente ainsi inversement avec la taille des gouttelettes. **La taille des gouttelettes est donc le facteur ayant la plus forte influence sur la dérive.** Il est donc important de maîtriser les limites du spectre de gouttelettes, c'est-à-dire le diamètre des plus petites gouttelettes et des plus grosses, ainsi que le nombre de gouttelettes produites dans chaque catégorie de taille. Des **gouttelettes trop fines** (inférieures à $100\text{ }\mu\text{m}$) **atteignent leur cible de façon aléatoire**, étant donné leur temps de chute long et leur sensibilité au vent. Des gouttelettes trop grosses (supérieures à $600\text{ }\mu\text{m}$) atteignent très vite leur cible mais risquent de ruisseler. Le diamètre des gouttes doit être compris entre 200 et $300\text{ }\mu\text{m}$ pour avoir des conditions d'application optimales. Les vitesses de chute des gouttelettes dans l'air varient selon leur diamètre.

a) La pression

La pression de pulvérisation est un paramètre important. Bien souvent, lorsque celle-ci augmente, la taille des gouttes diminue mais la vitesse des gouttes à la sortie de la buse augmente également. En général l'augmentation de la vitesse initiale des gouttes résulte en une diminution de la dérive.

b) Influence du type de buse sur la dérive

Il existe deux grands types de buses de pulvérisations : les buses à jets plats et les buses à cônes (moins souvent utilisés). Les buses à jets plats permettent une bonne distribution des gouttes lors de la pulvérisation. Il existe des « buses anti-dérive » qui produisent de plus grosses gouttes pour une même pression, sans réduction du débit par la création d'un jet plus épais.

c) Influence de la hauteur de pulvérisation sur la dérive

Lorsque la hauteur de la rampe augmente, le temps de chute des gouttes augmente également, les rendant plus sensibles à l'effet des conditions météorologiques. L'humidité relative a une importance toute particulière, car si ce paramètre est faible, le diamètre de la goutte est plus enclin à se voir diminuer, la rendant sensible à la dérive ou transport horizontal.

d) Influence de la formulation sur la dérive

Les propriétés physico-chimiques de la bouillie ont tout naturellement une influence sur la dérive. À noter qu'une substance active n'est jamais utilisée telle quelle. Elle est appliquée sous forme de formulations commerciales (PPP) contenant des **co-formulants** qui permettent d'en améliorer la stabilité et l'efficacité. Les co-formulants, comme les **adjuvants** ajoutés dans la cuve au moment de la pulvérisation (ex. : mouillants, humectants, safeners, etc.) peuvent avoir un impact considérable sur le devenir des pesticides après leur application car ils modifient les propriétés physico-chimiques de la bouillie (ex. : tension superficielle réduite) entraînant la formation de gouttes plus fines et donc plus sensibles à la dérive.

Des paramètres comme le taux d'évaporation, la viscosité, la tension de surface et la densité déterminent donc la persistance et la mobilité des gouttelettes. Une faible tension de surface réduit la taille des gouttes, ce qui permet plus facilement leur dispersion et leur volatilisation dans l'air. La présence d'un solvant volatil dans la formulation accentue cet effet. Une viscosité accrue de la bouillie mène à la formation de plus grosses gouttes, ce qui réduit le risque de dérive. La pression de vapeur est une mesure de la tendance qu'a un matériel (liquide ou solide) à se vaporiser : plus ce paramètre est élevé, plus grande sera cette tendance (les substances sont souvent caractérisées par leur constante de Henry). Il est préférable d'utiliser une substance active peu volatile si l'application de fines gouttes doit être effectuée, et ce, dans le but d'éviter la diminution du diamètre des gouttes. La formation d'aérosols est à éviter au maximum, car elle présente un plus grand risque de subir la dérive.

e) Influence du vent sur la dérive

La dérive des pesticides augmente considérablement avec **l'accroissement de la vitesse du vent**. L'énergie de déplacement nécessaire au transport des gouttes est directement fournie au liquide par la pression de pulvérisation. La résistance augmente avec la vitesse et diminue avec le diamètre des gouttes : les fines gouttelettes, dont la vitesse à la sortie de la buse est élevée, sont plus facilement freinées par l'air. Le vent agit sur la trajectoire et la direction que peuvent prendre les gouttes. Les gouttes de faible diamètre sont fortement enclines à subir les mouvements de l'air. Une vitesse de vent importante (supérieur à 5 m/s ou environ 18 km/h) augmente davantage la dérive. Il est d'ailleurs conseillé d'arrêter tout traitement quand le vent dépasse 15 km/h.

f) Influence de l'humidité relative et de la température de l'air sur la dérive

Les conditions climatiques jouent aussi un rôle. Plus la **température** est élevée, plus la vitesse de dessiccation des gouttes est importante (sans parler des mouvements de convection ascendants), et donc moins il y aura de produit à atteindre la plante (non seulement dérive par réduction du volume des gouttes, mais aussi volatilisation dans l'air). En ce qui concerne l'**hygrométrie**, le danger est représenté par les extrêmes. Si l'humidité relative est trop élevée, cela conduit à une perte du produit par ruissellement (écoulement de la bouillie des feuilles vers le sol). Réciproquement, lorsqu'elle est trop faible et/ou la température trop élevée, un séchage très rapide de la gouttelette est observé. On a aussi rapporté que les vapeurs de pesticides pouvaient être reconcentrées dans les gouttelettes de brouillard puis redéposées sur les végétaux.

Une goutte ne peut atteindre sa cible que lorsque son temps de chute (t) est inférieur à sa durée de vie. Cette **durée de vie augmente avec le diamètre de la goutte et l'humidité relative**. Mais se voit diminuer avec l'augmentation de la température de l'air ambiant. Ce comportement a été décrit avec la formule suivante :

$$t = \frac{d^2}{80\Delta T}$$

t : temps de chute de la gouttelette

d : diamètre moyen la gouttelette (en μm)

ΔT : différence de température en $^{\circ}\text{C}$ entre les thermomètres sec et humide.

On observe donc l'influence notoire que peut avoir l'HR sur la répartition de la bouillie dans les différentes « fractions ».

h) Influence de la technique et de l'appareillage utilisé sur la dérive

La taille des gouttes dépend encore du type de buse, de la taille de la buse, de la pression de travail et de la hauteur de travail. On l'a vu, le type de buse détermine la taille des gouttes à une pression déterminée.

Un **grand volume** de bouillie/ha **ou une forte pression** augmentent la dérive.

Plus **la hauteur de pulvérisation** est élevée, plus la durée de vie limite de la gouttelette est atteinte rapidement. Son diamètre de base se réduit et, par conséquent, elle devient plus sensible à la dérive. L'augmentation de la vitesse de déplacement peut dévier le jet vers l'arrière du pulvérisateur et l'entraîner dans des courants d'air ascendants et des tourbillons qui emprisonnent les fines gouttelettes et peuvent ainsi contribuer à la dérive.

La dérive, même si elle est limitée, est également possible pour les petits appareils. Elle peut être importante pour la canne centrifuge, mais elle est réduite au-delà de 6 à 8 m pour les appareils à dos (Gouda *et al.*, 2018).

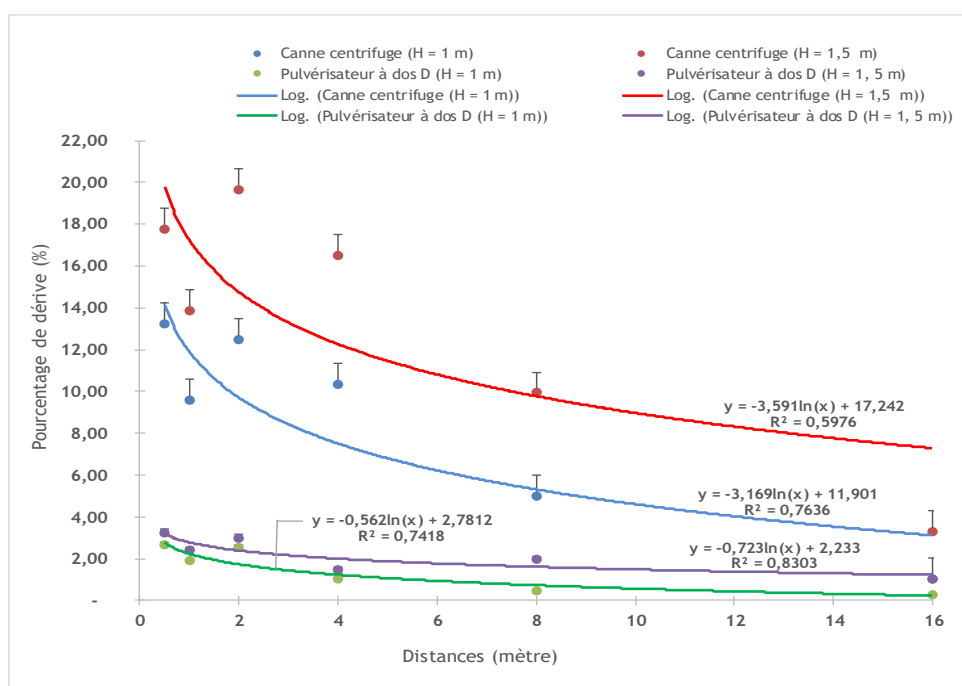


Figure 5 – Comparaison des pourcentages de dérives engendrées des deux appareils (pulvérisateur à dos et canne centrifuge) en fonction de différentes hauteurs de pulvérisation (H = 1 m et H = 1,5 m) et suivant les distances par rapport au point d'émission (de 0,5 à 16 mètres) (Gouda *et al.*, 2018).

3.3. Contamination de l'atmosphère par volatilisation et érosion éolienne

Dispersion par volatilisation

La **volatilisation** décrit le phénomène de **dispersion dans l'atmosphère qui survient** à la suite des **traitements phytopharmaceutiques**.

L'évaporation post-application (ou sublimation) des dépôts phytopharmaceutiques inclut d'abord une étape de diffusion des dépôts sous forme gazeuse au travers d'une couche d'air de faible épaisseur (environ un millimètre), appelée couche stagnante, à proximité

immédiate de la surface traitée, puis leur mélange dans les couches supérieures de l’atmosphère. La vaporisation des dépôts phytopharmaceutiques post-application est plus importante au départ du couvert végétal que des sols du fait de l’action des forces de rétention des constituants minéraux et organiques de ceux-ci.

Les flux de volatilisation de la substance active sont gouvernés par de nombreux facteurs comme :

- sa pression de vapeur et sa solubilité dans l’eau (partage entre air et eau),
- la valeur de la constante de Henry (volatilisation à partir de la phase aqueuse),
- son coefficient de sorption K_{oc} (volatilisation à partir de la phase solide),
- son temps de demi-vie dans l’air (persistance dans l’air).

On ne sait pas toujours que des substances de poids moléculaire élevé et hydrophobes (comme le DDT, un insecticide organochloré aujourd’hui non autorisé en agriculture), qui ont de très faibles pressions de vapeur et donc de très faibles concentrations atmosphériques, peuvent néanmoins se volatiliser sensiblement dans l’atmosphère, car elles sont aussi très peu solubles dans l’eau. La **constante de Henry¹⁷ (K_H) est donc un indicateur plus adapté que la pression de vapeur pour apprécier la volatilité** d’une substance active juste après son application sur les plantes, car elle tient compte de sa solubilité dans l’eau du sol. Le K_H quantifie le degré de partition à l’équilibre d’une substance entre la solution dans laquelle elle est dissoute et l’air. La constante de Henry d’un composé correspond au rapport de sa pression de vapeur (P, pression partielle du gaz en phase vapeur) sur son hydrosolubilité (S_{eau} , concentration du gaz dans la phase liquide) :

$$K_H = P / S_{eau} \text{ (Pa.m}^3\text{/mole)}$$

Plus K_H est élevée, plus la substance aura tendance à se volatiliser : les composés dans le tableau suivant qui ont une constante de Henry supérieure à $2,5.10^{-5}$ Pa.m³/mole sont considérés comme volatils (source : Marlière, 2001)¹⁸.

Tableau 7 – Solubilité et constante de Henri de différentes substances actives

Substance active	Solubilité dans l’eau (mg/L) à 25 °C	Valeurs du KH (Pa.m ³ /mole) à 25 °C	Type
Atrazine	35,0	$1,5.10^{-4}$	herbicide
Chlorpyrifos-éthyl	1,07	0,91	insecticide
Diuron	36,4	$5,1.10^{-5}$	herbicide
α et β Endosulfan	0,41(α) et (0,23) β	1,45	insecticide
Glyphosate	10500	$2,1.10^{-7}$	herbicide
Mancozèbe	2 – 20	$< 5,9.10^{-4}$	fongicide

17 Loi de Henry : la solubilité d’un gaz dans un liquide est proportionnelle à sa pression partielle au-dessus du liquide.
18 F. MARLIÈRE, *Pesticides dans l’air ambiant*, Laboratoire central de surveillance de la qualité de l’air, INERIS, 2001, pp. 1-56.

Le coefficient K_{oc} est un coefficient de partage entre le carbone organique contenu dans le sol (la matière organique) et l'eau du sol (c'est-à-dire la pellicule d'eau autour des particules de sol). Ce coefficient mesure la distribution à l'équilibre entre la phase aqueuse (dans laquelle la substance active est dissoute) et la matière organique¹⁹.

Le **Koc (en litre/kg) = $K / (\%OC)$** où K est le « coefficient de partage sol-eau », qui mesure le degré d'adsorption du pesticide par le sol et %OC est le pourcentage en carbone organique du sol (« l'humus ») considéré. La volatilité des pesticides dans les sols fait donc intervenir des notions de partage entre le sol et l'eau du sol. Les pesticides étant des substances organiques, on admet que ces composés ont plus d'affinité pour le complexe argilo-humique (complexe qui se forme entre argiles et constituants organiques du sol si les sols sont riches en matière organique). Ce coefficient dépend seulement de la nature de la substance active et pratiquement pas du type de sol.

Le temps de demi-vie (DT_{50}) dans l'atmosphère (en heures ou en jours) est un indicateur de la persistance d'un composé chimique dans l'air. Si la durée de demi-vie du pesticide augmente, la concentration dans l'atmosphère augmente, car la dégradation ne compense pas la volatilisation. À titre d'exemple, on peut citer le chlordécone (100 ans), l'atrazine (2 ou 3 jours) ou l'alachlore (4 heures). Les effets photochimiques et les oxydations destructrices réduisent les risques d'effets environnementaux aigus des pesticides libérés dans l'atmosphère.

■ Dispersion par érosion éolienne

L'érosion éolienne, définie comme la contamination de l'air par les dépôts adsorbés sur les particules du sol et arrachés par le vent, est surtout sensible dans les régions ventées, sur de grandes plaines dégagées, des sols légers et concerne les cultures à faible couverture végétale.

■ Déplacement des pesticides dans l'air

Le devenir des substances phytopharmaceutiques dans l'environnement est fortement influencé par leur capacité de passer d'un milieu à un autre. Dans les modèles de dispersion, l'air est assimilé à un « compartiment » (au même titre que l'eau ou le sol). Un compartiment est un sous-ensemble homogène de l'environnement, défini par sa taille, ses propriétés physiques et chimiques et les relations qu'il a avec les autres compartiments et par lesquelles les transferts de polluants sont possibles d'un compartiment à l'autre.

Dans l'atmosphère, les substances phytopharmaceutiques se distribuent entre les phases aqueuse, gazeuse et particulaire de l'air. L'unité de mesure de la pollution pour une substance de l'air est la concentration volumique ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ou la concentration massique ($\mu\text{g}/\text{kg}$). Deux composantes doivent être considérées : le déplacement dans l'air et la persistance dans l'air.

Le **déplacement dans l'air** s'effectue par la combinaison de deux mécanismes qui agissent en même temps :

1. les mouvements atmosphériques dispersent le polluant par mélange avec l'air environnant moins pollué et donc tendent à diminuer avec le temps le niveau de concentration (**diffusion**) ;

¹⁹ Voy. aussi le Manuel 9 du COLEACP/PIP, *La protection et la conservation des sols*, chapitre 2.

- la masse d'air contenant le polluant se déplace sous l'effet de mouvements turbulents (**advection**) qui se développent dans l'air instable ou qui sont engendrés par des cisaillements de vent et permettent ainsi aux pesticides d'être transportés sur de plus grandes distances.

La persistance est mesurée par le **temps de résidence du composé dans l'air qui dépend de sa vitesse, soit de transformation chimique, soit de déposition** au sol.

Les **transformations chimiques** incluent notamment la dégradation par le rayonnement ultraviolet (photolyse) ou la réaction avec des agents oxydants ou des radicaux libres de l'air.

Le **dépôt des pesticides** survient par des processus de retombées atmosphériques : les dépôts humides induits **par les précipitations** (pluie, neige) et les **dépôts secs** induits par les gaz et particules. Si les dépôts secs prédominent sur de courtes distances, les deux voies de dépôt interviennent dans les transports à longue distance. Les dépôts de produits phytopharmaceutiques peuvent être remis en suspension (particules) ou se volatiliser. Ce phénomène d'alternance volatilisation/dépôt, appelé **effet sauterelle**²⁰, dirige les composés vers les régions froides du globe et peut conduire à une dispersion de ces substances à l'échelle du globe.

La modélisation des transferts atmosphériques des polluants « phytopharmaceutiques » est un exercice complexe, car il demande la prise en compte de la grande variabilité des conditions rencontrées au cours des traitements (météo, sol, porosité du feuillage...). La grande majorité des modèles (souvent des modèles empiriques) employés pour décrire la dispersion atmosphérique des pesticides due à la dérive de pulvérisation décrit un phénomène sous l'influence de conditions météorologiques et opératoires connues au moment de l'application (conditions météo et conditions opératoires comme la vitesse, la buse, le volume, la pression, la hauteur de travail, etc.).

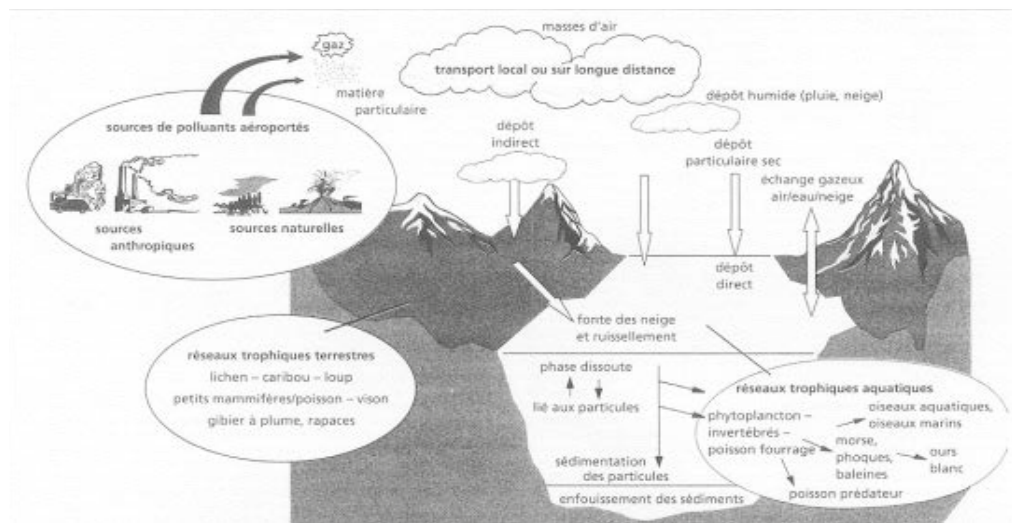


Figure 6 – Représentation de l'« effet sauterelle » responsable de la dispersion des pesticides à l'échelle du globe

20 L'effet sauterelle : processus géochimique qui conduit à l'accumulation de certaines substances chimiques, plus particulièrement les polluants organiques persistants (POP), dans les régions les plus froides, régions polaires et sommets des montagnes.

3.4. Concentration et distribution des pesticides dans l'air

Concentration des pesticides dans l'air

Il n'existe **pas**, à l'échelle **européenne**, de **normes ou réglementations** régissant l'échantillonnage et l'analyse des pesticides dans l'air ambiant. Les États membres ont donc pris l'initiative de mettre en place des plans locaux et régionaux de surveillance des polluants phytopharmaceutiques.

En France, par exemple, les Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA) ont développé une méthodologie basée sur deux méthodes américaines relatives au prélèvement et à l'analyse des pesticides dans le compartiment « air »²¹. Elle consiste à effectuer des prélèvements d'air sur une journée ou une semaine à l'aide d'un dispositif préleveur conventionnel. Le flux d'air (entre 30 et 60 m³/h pour les prélèvements journaliers et 1 m³/h pour les prélèvements hebdomadaires) traverse une cartouche contenant un filtre en fibre de quartz, qui retient les particules, et une mousse en polyuréthane qui piège les pesticides présents dans l'air.

À la fin des prélèvements, les cartouches filtrantes sont conditionnées dans des sacs isothermes et envoyées au laboratoire pour être analysées suivant les préconisations des méthodes EPA. Les produits volatils et les particules sont extraits sans différenciation (par désorption chimique ou par thermo-désorption), et analysés ensemble par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (CPG-MS), une méthode de séparation et d'identification des composés gazeux (ceux qui sont susceptibles d'être vaporisés par chauffage sans décomposition). La CPG-MS permet l'analyse de mélanges complexes dont les constituants diffèrent d'une façon considérable par leur nature et leur volatilité.

Dans la littérature²², on peut distinguer deux types de méthodes d'évaluation de l'exposition des populations aux pesticides présents dans l'air.



Figure 7 – Dispositifs de captage des pesticides pour mesurer la qualité de l'air

21 Méthodes EPA TO-4 et EPA TO-10.

22 Résultats tirés de C. Aschan-Leygonie, S. Baudet-Michel, C. Harpet, M. Augendre, É. Lavie, É. Grésillon et M. Hechinger, « Comment évaluer l'exposition aux pesticides dans l'air de la population ? », *Revue bibliographique*, 2015.

Un premier ensemble de méthodes se base sur des mesures de la présence de pesticides soit dans l’environnement (air extérieur, intérieur ou dans les poussières), soit dans les matrices biologiques (sang, sérum, urine, lait maternel, cheveux...). Un deuxième ensemble porte sur des estimations des expositions à partir des informations relatives à l’utilisation potentielle de pesticides au voisinage des lieux de résidence ou des déclarations d’utilisation de pesticides à domicile.

L’utilisation de prélèvements de pesticides dans les poussières ou dans l’air est une méthode intéressante, car les échantillons ainsi obtenus révèlent une exposition aérienne globale, c’est-à-dire mêlant une exposition à une utilisation extérieure, par exemple, agricole, et à une utilisation domestique (produits antiparasitaires ou de jardinage), par exemple, à des anti-moustiques ou anti-puces. Les niveaux de concentration dans les poussières peuvent aussi mettre en évidence une exposition accumulée sur un temps parfois long (un à quelques mois selon la méthode de collecte), alors que les mesures dans les matrices biologiques, comme les biomarqueurs de l’urine, mesurent la présence de pesticides dans le corps à un moment donné. Dans un certain nombre de travaux, des indicateurs d’exposition sont créés à partir de la quantité de pesticides supposée épanchée dans une zone. La quantité épanchée est estimée à partir de la quantité de substances chimiques vendue aux agriculteurs de la zone, ou, plus fréquemment, à partir des quantités de pesticides utilisées déclarées par les agriculteurs.



Figure 8 – Pesticides dans l’air : résultats d’une étude de 2016 sur la qualité de l’air en Île-de-France (38 molécules détectées sur 178 potentielles)

■ Distribution spatiale et temporelle des pesticides dans l'air

Les études de terrain menées en France ou en Belgique (ex. : étude EXPOPESTEN, 2014-2017) démontrent que **les contaminants phytopharmaceutiques sont présents dans l'air extérieur des zones rurales comme urbaines**. Leur présence a été notée à la fois pendant les périodes de traitements et hors période de traitements, montrant ainsi une **contamination chronique de l'atmosphère**.

La variabilité spatiale des niveaux d'exposition aux pesticides dans l'air peut s'expliquer par :

- une exposition plus importante aux pesticides de l'air **à proximité des champs** (analyse des poussières dans les résidences ou les concentrations dans les urines des riverains) ;
- un lien entre les superficies épandues et l'exposition des riverains (la concentration des pesticides dans l'air des habitations à proximité des champs est **plus élevée pendant les périodes de traitement** qu'en dehors de ces périodes).

Les niveaux les plus **élevés** observés dans l'air ambiant sont **représentatifs des pratiques agricoles réalisées** et des cultures (concentrations plus élevées près des vergers). Les mesures effectuées sur les sites où l'agriculture est largement dominée par les grandes cultures (céréales, maïs, tournesol, colza, etc.) montrent **la forte présence** dans l'air des substances actives utilisées pour ce type de culture.

Le pourcentage de détection de certaines molécules n'est jamais nul (il peut même atteindre 100 % des échantillons). Dans les campagnes de mesure de longue durée (annuelle ou pluriannuelle), certaines molécules sont **présentes 90 % du temps** (11 mois de l'année). Ce qui signifie qu'il n'y a **pas nécessairement un lien évident avec la saison culturale** et les moments où les pesticides sont appliqués. C'est le cas en particulier du lindane, un insecticide interdit depuis 1998.

D'autres molécules présentent des pourcentages de détection élevés uniquement pendant le printemps et l'été (folpel, tolylfluanide, chlorothalonil, endosulfan...) ou principalement en l'automne, comme la pendiméthaline. Enfin, il existe aussi certaines molécules qui n'ont jamais été, ou très rarement, observées (comme c'est le cas, p. ex., pour le diuron, le chlortoluron, la simazine et le dichlorvos pourtant très volatil). Certains pesticides ont vu leur taux de détection chuter depuis leur interdiction, alors qu'ils étaient largement présents avant cette date. C'est le cas de l'atrazine, du méthyl-parathion et de l'éthyl-parathion. Ces trois composés ont **presque complètement disparu** de l'air ambiant dans certaines régions depuis leur interdiction d'emploi. Par contre, il n'est pas rare de trouver sur des collecteurs passifs de nombreux pesticides dont l'emploi a été retiré depuis de longues années. En année sèche, par exemple, la poussière des champs est entraînée au loin et avec elle des traces des pesticides appliqués des années auparavant.



Chapitre 3

Les gaz à effet de serre et le bilan carbone

Les gaz à effet de serre (GES) et le climat	58
Les principaux accords internationaux relatifs aux GES.....	70
Les cycles de carbone et de l'azote	76
Les sources principales de GES dans le secteur de l'agriculture	80
Les différentes méthodes de calcul de GES dans le secteur de l'agriculture	85

Objectifs pédagogiques

À l'issue de ce chapitre, l'apprenant sera capable :

- connaître caractéristiques des différents gaz à effet de serre et leur contribution à la problématique du changement climatique
- identifier les sources de GES au sein d'une entreprise
- réaliser une analyse sommaire des postes émetteurs de GES dans une entreprise
- comprendre la notion de « puits de carbone »
- distinguer les différentes méthodes de calcul ou d'estimation des émissions de GES

1. LES GAZ À EFFET DE SERRE (GES) ET LE CLIMAT

1.1. Introduction

La masse de matière vivante est principalement sous la forme végétative ou animale sur la terre. Les conditions rencontrées déterminent en grande partie la répartition des ressources, laquelle peut être appréciée par la quantité de masse végétale présente sur une unité de surface.

Il existe un lien étroit entre l'homme et les types de climats. L'homme s'installe de préférence dans les endroits où **les conditions de vie sont favorables** (notamment la disponibilité en nourriture). Ceci explique la grande variabilité observée concernant les densités de population sur le globe et les migrations observées au cours des siècles. Depuis le Néolithique, c'est le secteur de l'agriculture (production végétale, animale) qui fournit l'essentiel des ressources alimentaires de l'homme.

Les **changements climatiques**, désormais une réalité scientifique mondiale, constituent une **contrainte supplémentaire** à l'existence humaine et au développement durable. L'agriculture y contribue à cause des émissions de gaz à effet de serre (GES), mais en subit également les impacts compte tenu de sa complexité, du nombre de personnes à nourrir et surtout des défis à relever.

Les impacts du changement climatique sont encore plus importants dans les pays moins avancés et très vulnérables, comme les pays ACP. Cependant, **le secteur agricole peut atténuer le réchauffement climatique** par l'adoption de pratiques culturales favorisant **le stockage de carbone** dans les sols.

1.2. Le soleil, source principale de l'énergie disponible à la surface terrestre

L'énergie disponible à la surface terrestre provient essentiellement du soleil sous forme de flux ou de rayonnement. Le flux solaire moyen incident d'une moyenne de 342 W/m^2 arrive perpendiculairement à la surface terrestre après la traversée de l'atmosphère sous l'influence de différents mécanismes (Figure 1a). Cette énergie est constituée de rayonnement lumineux détectable ou non à l'œil humain en fonction des longueurs d'onde : de l'ultraviolet (8 %) de longueur d'onde $0,2\text{-}0,4 \mu\text{m}$, du bleu au rouge (41 %) de longueur d'onde $0,4\text{-}0,7 \mu\text{m}$ et le proche infrarouge (51 %) de longueur d'onde $0,7\text{-}3,0 \mu\text{m}$ (Figure 1b).

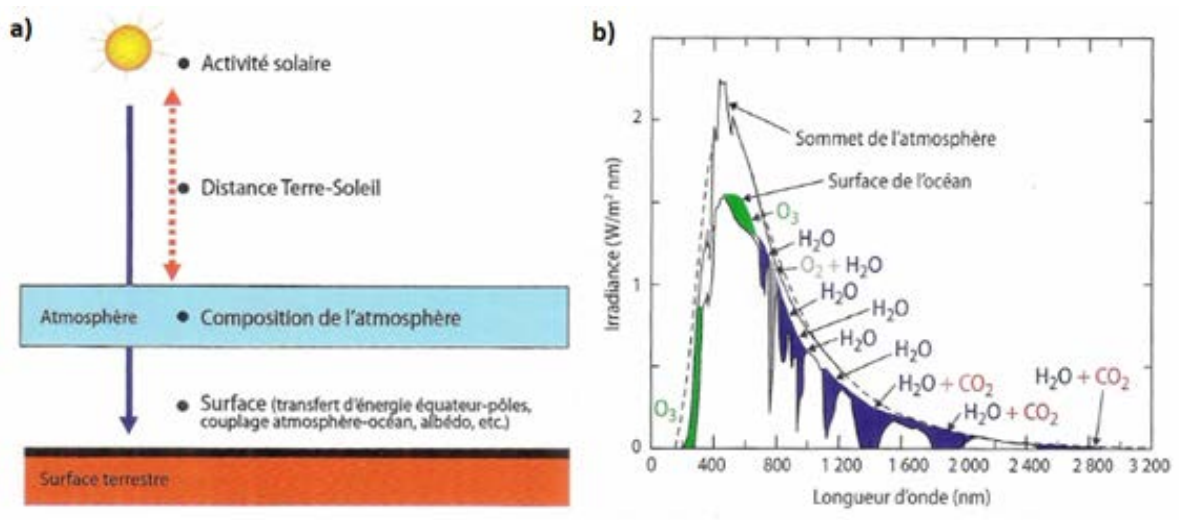


Figure 1 – Principales étapes dans la transmission de l'énergie solaire vers la surface de la Terre et les différentes longueurs d'onde (Mélières et Maréchal, 2015)

Il faut noter que la composition de l'atmosphère au moment de la traversée a un impact significatif sur les caractéristiques du rayonnement solaire. De même, différents mécanismes peuvent intervenir à la surface terrestre via les oscillations couplant les grands réservoirs de fluides (principalement océan et atmosphère), les modifications de la capacité d'absorption de l'énergie par la terre et sa répartition.

1.3. Composition de l'atmosphère et bilan énergétique de la Terre à l'équilibre

L'atmosphère est la couche gazeuse enveloppant la Terre et subdivisée en couches d'importance variable (la troposphère, la stratosphère, la mésosphère, la thermosphère et l'exosphère). Elle est **principalement constituée de trois gaz** chimiquement peu réactifs :

- l'azote moléculaire N_2 (78,08 %) ;
- l'oxygène moléculaire O_2 (20,95 %) ;
- l'argon Ar (0,93 %).

Ces gaz ne subissent pas de changement de phase et leur concentration relative est répartie de façon homogène sur les 80 premiers km de l'atmosphère. Viennent ensuite la vapeur d'eau H_2O (en moyenne 0,4 %) et le dioxyde de carbone CO_2 (0,039 %). Les autres composants sont les nuages, les aérosols et d'autres gaz dont le méthane CH_4 , l'oxyde nitreux N_2O et l'ozone O_3 qui contribuent peu à la masse atmosphérique. Bien que ces gaz subissent un cycle saisonnier, la teneur du CO_2 , N_2O et CH_4 reste également homogène en moyenne annuelle. Par contre, l'ozone et la vapeur d'eau n'ont pas le même comportement. La répartition de la vapeur d'eau est fortement liée à l'évaporation et la condensation.

L'atmosphère est **principalement chauffée par trois facteurs** :

- l'absorption d'une fraction (**G**) du flux solaire incident et une fraction (**K**) du flux thermique qu'émet la surface terrestre ;
- l'émission du flux de chaleur latente lors de la condensation de la vapeur d'eau ;

(iii) le chauffage direct de l'air au contact avec la surface terrestre. Lorsque l'atmosphère **émet vers la surface le flux radiatif (I)** et vers l'espace celui (**J**), elle se refroidit. Quant à la surface terrestre, elle est constamment chauffée par la fraction (**H**) du rayonnement solaire transmis directement au travers de l'atmosphère et par le flux thermique (**I**) réémis par l'atmosphère vers la surface terrestre. La surface de la Terre se refroidit sous l'effet de l'émission de flux de chaleur latente (**E**), chaleur sensible (**F**) et radiatif (**D**) émis par la terre.

Lorsque le bilan énergétique est équilibré, la température est stable, $H+I = F+E+D$ et $E+F+G+K = I+J$.

Comme on le voit, **la température moyenne** demeure l'un des principaux paramètres de l'évolution du climat. Cette température résulte en général d'un équilibre énergétique décrit par les échanges des flux d'énergie. L'atmosphère intervient également via le rôle transversal et capital du cycle de l'eau dans le système climatique global (p. ex., répartition des précipitations sur la Terre) par :

- l'énergie transférée de la surface terrestre aux diverses couches atmosphériques à partir des mécanismes d'évaporation et de condensation ;
- la vapeur d'eau qui est le principal contributeur à l'effet de serre ;
- les nuages qui refroidissent et réchauffent à la fois la surface terrestre (réflexion rayonnement solaire et effet de serre).

Il faut noter que les **échanges** s'effectuant entre l'atmosphère et la surface terrestre sont influencés significativement par des facteurs naturels, mais **également** et surtout anthropiques. Globalement, la couche atmosphérique joue un rôle important dans le bilan énergétique à la surface terrestre via les divers mécanismes interagissant avec les flux solaire et tellurique.

1.4. Le climat et les changements climatiques

La quantité d'énergie reçue à la surface terrestre et sa répartition au cours des saisons constitue bien le moteur principal du climat. En effet, le terme²³ « climat » serait dérivé du latin *climatis* provenant du grec *klima* (inclinaison de la planète Terre vers le **pôle**). Il détermine le temps qu'il fait en un endroit donné et est caractérisé par les principaux paramètres météorologiques (rayonnement, température, précipitation, humidité, pression) permettant sa meilleure description. Ces grandeurs sont **variables à la surface terrestre** de par leur valeur moyenne annuelle et leur évolution au cours des saisons. Il en résulte l'existence de **différents types de climat**, extrêmement variés selon la classification de Köppen (Kottek *et al.*, 2006) : tropical humide, subtropical, tropical sec, subarctique, tempéré et polaire.

Quant aux **changements climatiques**, ils sont, d'après la CCNUCC²⁴, « les changements du climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent à s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables ».

23 Dictionnaire de l'Académie française, 8e éd., 1932-1935.

24 Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques.



Le **réchauffement climatique** désigne des bouleversements significatifs des conditions climatiques, des phénomènes exceptionnels avec leurs fréquences, des températures sortant de leurs gammes de valeurs moyennes habituelles, des rétroactions et une augmentation continue des concentrations des GES (CO₂ en particulier) dans l'atmosphère.

Les changements climatiques traduisent toutes les modifications globales **statistiquement significatives** intervenues dans l'évolution du climat global sur de longues périodes (généralement pendant plusieurs décennies ou plus), qui sont principalement d'origine anthropique (GIEC, 2013).

En effet, les activités humaines ont contribué depuis 1750 à modifier significativement la composition chimique de l'atmosphère. Cette rétroaction impactera encore pendant longtemps la vie terrestre, les écosystèmes naturels et le développement. Un groupe d'experts internationaux s'est constitué à la fin des années 1980 pour suivre les évolutions du climat. Leurs travaux ont pu montrer que, depuis la fin du XIX^e siècle, **la température moyenne à la surface terrestre avait augmenté d'environ 1 °C**. Plusieurs modèles prévoient un réchauffement global de **plus de 2 °C d'ici la fin du XXI^e siècle**, si rien n'est fait (GIEC, 2013). Une telle situation mettrait sérieusement en péril la vie, les écosystèmes terrestres, les activités socio-économiques, notre civilisation, en un mot le développement durable.

1.5. Les principaux GES et le principe de l'« effet de serre »

Globalement, un peu plus de 50 % du rayonnement solaire sont absorbés par la croûte terrestre et les océans, 20 % par l'atmosphère et 30 % directement renvoyés par l'atmosphère vers l'espace.

Les **rayonnements visibles** de courte longueur d'onde traversent l'atmosphère avant d'être absorbés par la surface terrestre qu'ils réchauffent. Une partie du rayonnement thermique de longue longueur d'onde émis par la surface réchauffée est partiellement absorbée par l'atmosphère (notamment par certains gaz présents en faible concentration). La seconde partie est transmise directement à l'espace quittant la surface terrestre. Les flux d'énergie absorbés **réchauffent l'atmosphère puis sont réémis à parts égales vers l'espace et la surface terrestre**.

Pendant ce temps, une grande partie du **rayonnement infrarouge émis par le soleil** est captée par l'atmosphère et **rediffusée vers la surface terrestre**.

En somme, la surface de la Terre reçoit (et absorbe) les rayonnements solaires intégralement transmis **à travers** l'atmosphère, mais en plus une partie non négligeable du flux infrarouge émis par la surface terrestre. Le résultat de l'ensemble de ces mécanismes est le réchauffement de la surface de la Terre. C'est **l'effet de serre** (Figure 2).

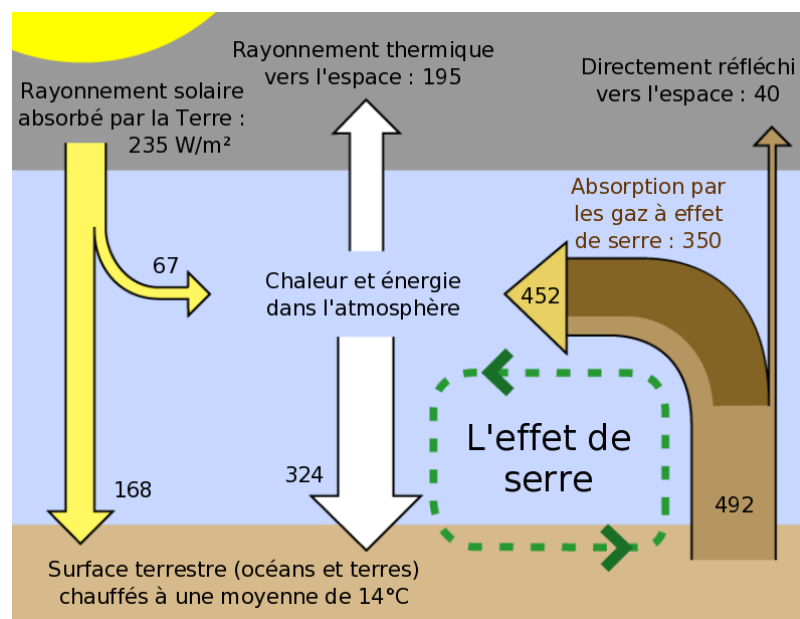


Figure 2 – Évolution du rayonnement solaire et effet de serre (fr.wikipedia.org/wiki).

L'effet de serre est donc un mécanisme naturel qui permet de retenir à la surface terrestre la chaleur due à l'absorption et la réémission des rayonnements dans l'atmosphère. Les principaux gaz à effet de serre (GES) naturellement présents dans l'atmosphère sont la vapeur d'eau (H_2O), le dioxyde de carbone (CO_2), l'ozone (O_3), le méthane (CH_4) et le protoxyde d'azote (N_2O).

En l'absence de ces gaz dans l'atmosphère, les rayonnements émis dans l'infrarouge par la surface terrestre s'échapperaient dans leur quasi-totalité. Dans ce cas, la surface de la Terre maintiendrait sa température moyenne globale à $-18\text{ }^\circ\text{C}$ et se refroidirait plus, rendant la vie impossible sur la Terre. L'effet de serre permet de maintenir à $+15\text{ }^\circ\text{C}$ la température moyenne globale à la surface terrestre. De ce point de vue, **c'est un mécanisme très utile pour les êtres vivants** et parfaitement compris qui repose sur des principes scientifiques bien établis. Il n'est pas nécessaire de recourir à des modèles pour sa description et sa quantification.

Ce phénomène est **totalemtent différent** de la réduction de la concentration en ozone (O_3), principalement due à la destruction chimique par certains composés dans certaines couches de l'atmosphère. En effet, l'ozone absorbe les rayonnements ultraviolets (très énergétiques) émis par le soleil et qui se sont révélés très négatifs pour les êtres vivants.

L'action des GES est confirmée par des observations satellitaires des flux émis par la surface de la Terre d'une part et au travers de l'atmosphère d'autre part. Les températures moyennes à la surface de la Terre ont également connu de fortes variations (de 5 à $7\text{ }^\circ\text{C}$) entre les périodes interglaciaires et celles glaciaires (Houghton, 1991). Ces résultats sont expliqués par les variations des teneurs de GES dans l'atmosphère, suggérant **une corrélation significative positive entre les concentrations des GES et les températures moyennes globales à la surface terrestre**.

Ces observations rendent finalement difficile la détermination de la cause et de l'effet entre ces deux variables indispensables pour suivre le climat ainsi que ses modifications globales. En dehors de la vapeur d'eau (H_2O), les autres GES restent plus longtemps

dans l'atmosphère : en moyenne 12 ans pour le méthane CH_4 , un siècle pour le dioxyde de carbone CO_2 , 120 ans pour l'oxyde nitreux N_2O et plus de 50 000 ans pour certains **gaz halogénés** (CF_4 , autres).

Ces dernières années, **les activités humaines** ont sérieusement favorisé les émissions des GES (Tableau 1), contribuant ainsi à augmenter leur concentration dans l'atmosphère.

Tableau 1 – Quelques sources d'émission des principaux GES

Gaz à effet de serre	Sources d'émission	
	Naturelle	Humaine
Vapeur d'eau (H_2O)	<ul style="list-style-type: none"> Évaporation de l'eau, surtout au-dessus des océans 	<ul style="list-style-type: none"> Centrales électriques Irrigation
Dioxyde de carbone (CO_2)	<ul style="list-style-type: none"> Respiration des êtres vivants Feux de forêt Volcans... 	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation massive d'énergies fossiles pour les transports, les bâtiments et l'agriculture Déforestation
Méthane (CH_4)	<ul style="list-style-type: none"> Digestion des herbivores Décomposition des végétaux Volcans 	<ul style="list-style-type: none"> Intensification des élevages (bovin) et cultures (riz) Décharge d'ordures
Protoxyde d'azote (N_2O)	<ul style="list-style-type: none"> Marécages 	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation d'engrais azotés
Ozone de basse atmosphère (O_3)	<ul style="list-style-type: none"> Foudre 	<ul style="list-style-type: none"> Industrie Circulation automobile
Gaz fluorés (CFC, HFC, PFC)	<ul style="list-style-type: none"> N'existent pas dans la nature 	<ul style="list-style-type: none"> Gaz des bombes aérosols et des climatiseurs

1.6. Responsabilité des GES dans le réchauffement climatique

L'effet de serre impacte la température moyenne globale enregistrée à la surface terrestre. Ainsi, tout facteur (naturel ou anthropique) qui induit une variation significative d'un terme du bilan énergétique renforce les changements climatiques. Ces dernières décennies, le plus important des bouleversements demeure **l'augmentation continue des concentrations des GES dans l'atmosphère**. Cela a modifié de façon significative les flux de chauffage de la surface terrestre, en provoquant un forçage radiatif qui perturbe sérieusement l'équilibre climatique (GIEC 2013).

Mélières et Maréchal (2015) avaient insisté sur l'influence de la composition atmosphérique dans l'équilibre climatique global à travers trois principaux mécanismes :

- la réflexion d'une partie du rayonnement solaire qui prive la surface terrestre de l'apport de la chaleur, donc la refroidit ;
- l'absorption d'une partie de ce même rayonnement qui, également, prive la surface terrestre de la chaleur et donc la refroidit ;
- l'absorption du rayonnement thermique émis par la surface terrestre qui la réchauffe en retour à travers l'effet de serre.

En effet, l'accroissement continu des concentrations des GES dans l'atmosphère **amplifie l'effet de serre**. L'une des conséquences est la **modification du cycle naturel des échanges** entre l'atmosphère et la surface terrestre. On constate que la part de l'UFTC (utilisation des terres pour les exploiter) dans les émissions mondiales des GES est très importante (Figure 3).

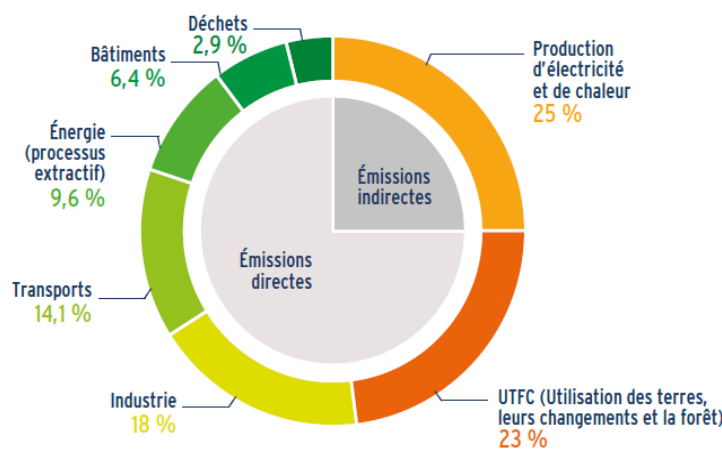


Figure 3 – Répartition des émissions mondiales de GES en 2010 par secteur [CDC Climat, 2015]

Si la **production d'énergie et de chaleur demeure la principale source émissive** (25 %), l'utilisation des terres et forêt pour satisfaire divers besoins humains (23 %), l'industrie (18 %) et le transport (14,1 %) suivent. En effet, l'exploitation des combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel et lignite) a connu une forte croissance dans le monde depuis le XIX^e siècle. Selon les études récentes, le **secteur de l'agriculture/production alimentaire pourrait être responsable de 35 % des émissions totales mondiales de GES**. En particulier, l'agriculture et la forêt émettent ensemble 76 % du méthane, 89 % du protoxyde d'azote (N₂O), 10 % d'oxydes d'azote (NO_x), 50 % de COV biogènes et 97 % de l'ammoniac présents dans l'air²⁵.



Les activités humaines n'agissent souvent pas seulement par l'augmentation des concentrations des GES, mais également par l'intermédiaire d'autres effets liés à l'albédo, aux émissions d'aérosols et au cycle de l'eau.

Par ailleurs, tous les GES n'ont pas le même impact sur l'évolution du climat. La contribution à l'effet de serre d'un gaz s'exprime grâce à **l'indicateur PRG**²⁶, correspondant à son effet sur le réchauffement du climat cumulé sur une durée de 100 ans (GIEC, 2013). Il vaut pour le CO₂ (**1** par convention), le CH₄ (**25**) et le N₂O (**298**).

25 Il faut noter en outre que les NO_x et COV constituent de véritables précurseurs d'ozone.

26 PRG = potentiel de réchauffement global.

L'équivalent dioxyde de carbone (équivalent CO₂) est une mesure métrique utilisée pour comparer les émissions de divers gaz à effet de serre sur la base de leur potentiel de réchauffement global (PRG), en convertissant les quantités des divers gaz émis en la quantité équivalente de dioxyde de carbone ayant le même potentiel de réchauffement planétaire.

Les équivalents dioxyde de carbone sont généralement exprimés en millions de tonnes métriques d'équivalents dioxyde de carbone. L'équivalent dioxyde de carbone pour un gaz est obtenu en multipliant les tonnes de gaz par le PRG associé : millions de tonnes métriques d'équivalents dioxyde de carbone = (millions de tonnes métriques de gaz) * (PRG du gaz).

Par exemple, le PRG pour le méthane est 25 et pour l'oxyde nitreux 298. Cela signifie que les émissions d'1 million de tonnes métriques de méthane et d'oxyde nitreux sont respectivement équivalentes aux émissions de 25 et 298 millions de tonnes métriques de dioxyde de carbone.

Source : EUROSTAT, 2019

Le forçage radiatif permet également d'évaluer l'impact des GES sur le système climatique global et de les comparer (Figure 4). Il représente l'effet de serre spécifique induit du gaz. D'après le GIEC (2013), la plus grande contribution au changement climatique vient de l'augmentation continue depuis 1750 de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère. Le forçage radiatif total calculé donne une valeur positive confirmant le réchauffement effectif du système climatique global. Cependant, si les émissions de GES cessaient, le réchauffement climatique, et surtout ses impacts, ne s'arrêteraient qu'après 100 ans **à cause** des particularités des GES et surtout des réactions en chaînes souvent engendrées (GIEC, 2013).

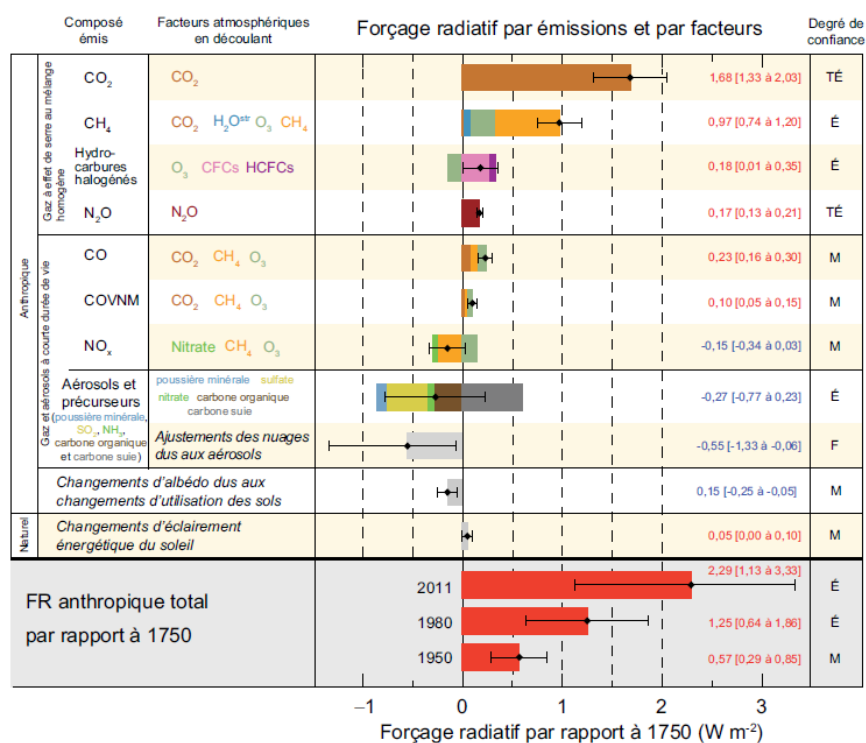


Figure 4 – Estimations du forçage radiatif moyen en 2011 par rapport à 1750 et incertitudes associées concernant les principaux facteurs des changements climatiques (GIEC, 2013)

1.7. Rôle des énergies fossiles dans les émissions des GES

La satisfaction des besoins vitaux de l'homme (éclairage, cuisson des aliments, production, mobilité, confort, communications, etc.) dépend de la disponibilité des services énergétiques. Au XXI^e siècle, **la croissance de la population mondiale**, le développement industriel et l'accélération de l'urbanisation s'accompagnent également d'une forte demande en énergie, qui est donc en expansion. On enregistre une hausse continue de la demande d'énergie et des services connexes partout, faisant passer **la demande énergétique mondiale** de 5 500 Mtep²⁷ en 1971 à 10 300 Mtep en 2002. Pour l'année 2030, cette croissance énergétique mondiale serait évaluée à 16 500 Mtep (IEA²⁸ 2004).

Quant à la production mondiale d'énergie commercialisée, elle était estimée à 13 276 Mtep en 2016 par Bristish Petroleum (BP), ce qui affichait déjà une progression de 18 % par rapport à 2006. Cette production énergétique est répartie en 33,0 % de pétrole, 27,5 % de charbon, 24,2 % de gaz naturel, 4,5 % de nucléaire et 10,7 % d'énergies renouvelables (hydroélectricité 6,9 %, éolien 1,6 %, biomasse et géothermie 1,0 %, biocarburants 0,6 %, solaire 0,6 %).

Depuis 1850, les **combustibles fossiles** (charbon, pétrole et gaz naturel) jouent un rôle important pour assurer l'essentiel de l'approvisionnement mondial d'énergie. Ils sont constitués en général de mélanges de composés riches en carbone issus de la fossilisation de matières organiques. La composition varie suivant les origines complexes et diverses des gisements. Les composés organiques issus des processus de transformation sont **toxiques pour l'être vivant**. De plus, ces derniers peuvent générer avec l'oxygène de l'air de nouveaux composés dont certains sont toxiques dans une réaction de combustion vive. L'importance de cette forme d'énergie a conduit ces dernières années à la surexploitation des ressources naturelles dans le monde, modifiant de façon significative notre environnement.

Effectivement, la **consommation mondiale d'énergie n'a cessé d'augmenter** depuis la révolution industrielle passant de 1 500 en 1945 à 13 511,2 Mtep en 2017. Celle-ci reste largement dominée par les combustibles fossiles avec 85,2 % de contribution en 2017 et répartie en 34,2 % de pétrole, 27,6 % du charbon et 23,4 % du gaz naturel. D'après le GIEC (2013), la tendance s'est poursuivie en 2008 (Figure 5).

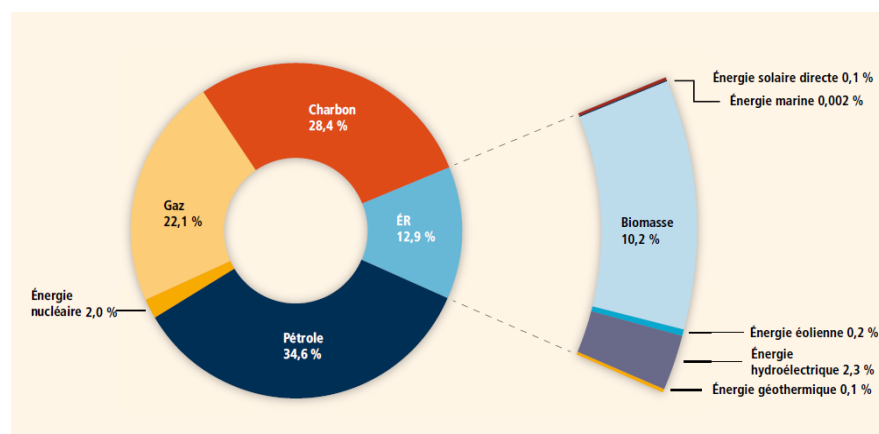


Figure 5 – Proportion des diverses sources d'énergie dans l'approvisionnement mondial total en énergie primaire en 2008 (d'après GIEC, 2013)

27 Mtep signifie Mégatonne équivalent pétrole.

28 IEA signifie *International Energy Agency*.

Par ailleurs, les matières premières sont soumises à divers traitements conduisant au produit final à commercialiser, et sont stockées et transportées souvent sur de longues distances. Le processus de transformation consiste à extraire du sous-sol les combustibles fossiles et à effectuer les traitements appropriés. Présents dans le sous-sol et utilisés depuis des millions d'années, ces combustibles s'épuisent avec l'exploitation, car ils sont en quantités limitées et non renouvelables. En suivant les principales étapes de production et d'utilisation des sources d'énergie fossiles, on peut distinguer les émissions suivantes (Landrieu, 1994).

■ Extraction des combustibles

Les exploitations des combustibles fossiles sont généralement précédées d'importantes excavations, de la destruction des écosystèmes, y compris la faune et la flore, de l'apparition des affaissements ou ravins, de l'altération de la qualité des ressources en eau, de la perte de la biodiversité et des boues de forage. Ces actions s'accompagnent d'émissions dans l'atmosphère des gaz de gisement ainsi que ceux issus des processus de combustion ou ceux stockés dans les écosystèmes détruits.

■ Installations de préparation et d'acheminement des combustibles

La préparation et surtout le transport des combustibles fossiles nécessitent de lourdes infrastructures (routes, ports, conduites de raffinerie, stockage...) sur des espaces spécifiques comme les littoraux et vallées. Certaines opérations (raffinage et autres) émettent des composés organiques gazeux et de liquides toxiques (phénols, produits ammoniacaux...) dans l'atmosphère. Aussi, le fonctionnement de tout le système nécessite de l'énergie souvent produite sur les sites avec la combustion d'une partie du combustible concerné. Cette option génère dans l'atmosphère d'importantes émissions de gaz et des composés toxiques.

■ Équipements d'utilisation des combustibles

La transformation de l'énergie chimique des combustibles fossiles, le fonctionnement des engins et centrales électriques produisent de la chaleur et engendrent des émissions considérables de gaz et de composés toxiques dans l'atmosphère.

■ Existence des fuites lors des filières d'approvisionnement des combustibles

On enregistre souvent des évasions d'hydrocarbures dans la filière pétrolière. Les accidents pétroliers en mer (marées noires, ruptures de pipeline) sont importants (environ 0,1 % du volume transporté en mer). Les échanges atmosphère/océan sont souvent empoisonnés, car les cours d'eau et les océans sont chargés. De même, des pertes d'hydrocarbures volatils (0,3 % du flux total) surviennent pendant les opérations de stockage. Une partie, notamment le méthane, s'échappe dans l'atmosphère tout au long de la filière du gaz naturel. Des matières volatiles s'échappent également dans l'atmosphère lors des opérations d'extraction du charbon. Le stockage et la manutention du charbon induisent d'importantes émissions de matières toxiques (stockages exposés au vent, véhicules non couverts).

■ Le rejet final des produits de combustion

Le charbon et le pétrole brut contiennent du soufre, mais la moyenne avoisine 1 % de leur poids en soufre. En présence de l'oxygène de l'air, la combustion produit des oxydes d'azote (**NOx**) par oxydation de l'azote organique du combustible ou celui de l'air. Lorsque la combustion est incomplète, il y a des émissions de monoxydes de carbone (**CO**), d'imbrûlés (particule de **C**), d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (**HAP**) et d'autres composés organiques volatils (**COV**). En combustion complète, il y a des émissions de composés de dioxyde de carbone (**CO₂**), de vapeur d'eau (**H₂O**) et de dioxyde de soufre (**SO₂**). Cependant, il existe des traitements spécifiques qui limitent les rejets d'oxydes d'azote. Mais, le processus conduit également à la production d'autres déchets solides. Il faut noter que les véhicules de transport utilisés sur les sites d'exploitation induisent des émissions de monoxyde de carbone et composés organiques volatils. Pendant la combustion, des oxydes d'azote sont produits avec des taux relativement élevés dans les moteurs.

En définitive, les filières de production et d'utilisation de combustibles fossiles engendrent l'émission de composés gazeux, en particulier le **CO₂**, le **CH₄** et le **N₂O**. Jusqu'à présent, leur utilisation reste la principale source d'émissions anthropiques de **CO₂**. En 2017, ces émissions étaient $9,9 \pm 0,5$ GtC et représentaient 82 % du total (Le Quéré *et al.*, 2018). Cette croissance continue de **CO₂** due à l'usage d'énergie fossile ne cesse de renforcer l'effet de serre, et par conséquent le réchauffement climatique qui se traduit par l'augmentation de la température moyenne à la surface de la Terre.

1.8. Revue rapide des autres sources d'énergie et leurs avantages ou inconvénients

La maîtrise du secteur de l'énergie (de la production à la consommation) reste l'un des défis majeurs de notre siècle, surtout dans un contexte de développement durable. C'est ce cadre qu'offre l'Objectif pour le développement durable (ODD) 7 : « Garantir l'accès de tous à des services énergétiques fiables, durables et modernes, à un coût abordable ». Pour y parvenir, il faudra non seulement mettre l'accent sur toutes les formes d'énergie, mais également et surtout adopter des stratégies pertinentes pour réaliser l'ODD 13 : « Prendre d'urgence des mesures pour lutter contre les changements climatiques et leurs répercussions ».

En plus du combustible fossile, les autres formes d'énergie (hydroélectricité, biocarburant, géothermie, biomasse, solaire et éolien) ont un rôle à jouer à cause de leur contribution de 20 % à la consommation mondiale. En 2016, les émissions totales mondiales de **CO₂** liées à l'énergie étaient de 33 432 Mt., indiquant **une progression de 13,6 % par rapport à 2006 et 54,8 % depuis 1990**. De toute évidence, **les autres sources d'énergie induisent aussi d'importantes émissions de GES** dans l'atmosphère. En 2009, PICIR²⁹ a démontré qu'il ne fallait pas émettre d'ici à 2050 plus de 565 Gt de **CO₂** pour garder 80 % des chances d'être en dessous des 2 °C. Chacune des sources d'énergies présente des avantages et des inconvénients (Tableau 2).

Tableau 2 – Avantages et inconvénients liés aux principales sources d'énergie

Sources d'énergie	Avantages	Inconvénients
Énergie fossile	<ul style="list-style-type: none"> • En stock • Coût acceptable 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitée, stock épuisable • Demande et coûts augmentent • Exploitation de plus en plus coûteuse • Pollution importante • Émission importante de CO2 et autres GES
Énergie nucléaire	<ul style="list-style-type: none"> • En stock • Gros pouvoir énergétique • Presque pas d'émission de GES • Augmentation possible durée de vie des stocks 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitée, stock épuisable • Déchets radioactifs difficile à recycler • Très dangereux en cas d'accident
Énergie éolienne	<ul style="list-style-type: none"> • Illimitée • Énergie propre 	<ul style="list-style-type: none"> • Énergie de flux • Stockage difficile • Production discontinue • Installation lourde sur grande surface
Énergie solaire	<ul style="list-style-type: none"> • Illimitée • Énergie propre • Fort potentiel de développement 	<ul style="list-style-type: none"> • Énergie de flux • Stockage difficile • Production discontinue • Coût élevé
Énergie hydraulique	<ul style="list-style-type: none"> • Fort potentiel de développement • Énergie propre • Technologie maîtrisée 	<ul style="list-style-type: none"> • Contraintes géographiques • Impact sur l'écosystème • Investissements lourds
Biomasse	<ul style="list-style-type: none"> • Énergie considérée comme propre 	<ul style="list-style-type: none"> • Faible rendement énergétique • Risque de déstabilisation de l'écosystème (déforestation, dégradation...), compétition accrue pour les terres
Géothermie	<ul style="list-style-type: none"> • En stock • Énergie propre 	<ul style="list-style-type: none"> • Contraintes géographiques • Faible rendement énergétique

2. LES PRINCIPAUX ACCORDS INTERNATIONAUX RELATIFS AUX GES

2.1. Introduction

Les changements climatiques sont la question déterminante de notre époque et nous sommes à un moment décisif. De l'évolution des conditions météorologiques, qui ont des effets sur la production agricole et alimentaire, à l'élévation du niveau des mers, qui augmente les risques d'inondations, les conséquences des changements climatiques sont mondiales en termes d'effets et d'échelle. Sans action immédiate, il sera beaucoup plus difficile et coûteux de s'adapter aux conséquences futures de ces changements.

La communauté internationale ne cesse de définir des stratégies et mesures limitant le réchauffement climatique à moins de 2 °C.

2.2. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)³⁰

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a été créé en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et ONU Environnement en vue de fournir des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de parade. En 2013, le GIEC a clarifié le rôle des activités humaines dans le changement climatique en publiant son cinquième *Rapport d'évaluation*. **Sa conclusion est catégorique : le changement climatique est réel et les activités humaines en sont la cause principale.**

Le cinquième *Rapport d'évaluation* du GIEC confirme que le réchauffement du système climatique est sans équivoque et que nombre des changements observés sont sans précédent depuis des décennies, voire des millénaires : réchauffement de l'atmosphère et des océans, diminution de la couverture neigeuse et recul des glaces, élévation du niveau des mers et augmentation des concentrations de gaz à effet de serre. Le rapport estime également les émissions cumulées de CO₂ depuis l'époque préindustrielle et fournit un budget de CO₂ pour les émissions futures afin de limiter le réchauffement climatique à moins de 2 °C. Selon le rapport du GIEC :

- la température moyenne mondiale a augmenté de 0,85 °C entre 1880 et 2012.
- En raison du réchauffement des océans, la hausse du niveau des mers est un phénomène sans équivoque. La cryosphère – qui désigne toutes les parties de la surface de la Terre où l'eau est à l'état solide (glace et neige) – est en diminution constante. Sur la période 1901-2010, le niveau de la mer a augmenté de 19 cm en moyenne. L'étendue moyenne annuelle de la banquise arctique a diminué au cours de la période 1979-2012 à une vitesse qui se situait très probablement entre 3,5 et 4,1 % par décennie.
- Compte tenu des concentrations actuelles et des émissions de gaz à effet de serre en cours, il est probable qu'à la fin du siècle, la température moyenne mondiale continuera à dépasser le niveau préindustriel. Les océans du monde se réchaufferont et la glace continuera de fondre. L'élévation moyenne du niveau de la mer devrait être de 24 à 30 cm d'ici 2065 et de 40 à 63 cm d'ici 2100 par rapport à la période de référence de 1986 à 2005. La plupart des aspects du changement climatique persisteront pendant plusieurs siècles, même si les émissions sont stoppées.

30

Texte extrait de www.un.org/fr/sections/issues-depth/climate-change/index.html.

Il est alarmant de constater que d'importants points d'inflexion, entraînant des changements irréversibles dans les grands écosystèmes et le système climatique planétaire, ont peut-être déjà été atteints ou franchis. Des écosystèmes aussi diversifiés que la forêt tropicale amazonienne ou la toundra arctique peuvent se rapprocher des seuils de changement spectaculaire en raison du réchauffement et de la sécheresse. Le recul des glaciers de montagne est alarmant et les conséquences de cette diminution en aval affecteront l'approvisionnement en eau au cours des mois les plus secs, de même que les générations futures.

En octobre 2018, le GIEC a publié un rapport spécial sur les effets du réchauffement planétaire de 1,5 °C. Il a été établi que, pour limiter le réchauffement planétaire à 1,5 °C, des changements rapides, d'une portée considérable et sans précédent, seraient nécessaires dans tous les aspects de la société. Le *Rapport*, qui présente des avantages évidents pour les populations et les écosystèmes naturels, a montré que limiter le réchauffement planétaire à 1,5 °C au lieu de 2 °C pouvait aller de pair avec une société plus durable et plus équitable. Alors que les estimations précédentes étaient axées sur l'estimation des dommages si les températures moyennes devaient augmenter de 2 °C, le présent *Rapport* montre que nombre des impacts négatifs du changement climatique se situeront à 1,5 °C.

Ce Rapport met en exergue un certain nombre de conséquences des changements climatiques qui pourraient être évitées si le réchauffement était limité 1,5 °C, et non à 2 °C ou plus. Ainsi, d'ici à 2100, le niveau de la mer à l'échelle de la planète serait, si le réchauffement était limité à 1,5 °C, inférieur de 10 cm à celui qui risquerait d'être enregistré s'il était limité à 2 °C. La probabilité que l'océan Arctique soit libre de glace en été serait d'une fois par siècle si le réchauffement est limité à 1,5 °C, mais d'au moins une fois tous les dix ans s'il est limité à 2 °C. Avec un réchauffement de 1,5 °C, 70 à 90 % des récifs coralliens disparaîtraient, alors qu'avec un réchauffement de 2 °C, la quasi-totalité (> 99 %) serait anéantie.

Il est indiqué dans le *Rapport* que la limitation du réchauffement planétaire à 1,5 °C nécessiterait des **transitions « rapides et de grande envergure »** dans les domaines de l'aménagement du territoire, de l'énergie, de l'industrie, du bâtiment, du transport et de l'urbanisme. Les émissions mondiales nettes de dioxyde de carbone (CO₂) d'origine anthropique devraient être réduites d'environ 45 % par rapport aux niveaux de 2010 d'ici à 2030, et **il faudrait atteindre un « bilan nul » des émissions** aux alentours de 2050, ce qui signifie que les émissions restantes devraient être compensées en éliminant du CO₂ de l'atmosphère.

2.3. La Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC)³¹

Les changements climatiques constituent un problème complexe, qui, bien qu'étant de nature environnementale, a des conséquences sur beaucoup d'issues globales telles que la pauvreté, le développement économique, la croissance de la population, le développement durable et la gestion des ressources. La réponse aux changements climatiques passe par une réduction des émissions. **En 1992, des pays ont joint un traité international** – la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements

31 Texte extrait de www.un.org/fr/sections/issues-depth/climate-change/index.html.

climatiques (CCNUCC) – en vue de considérer ce qui pouvait être fait pour réduire le réchauffement global et faire face à toute hausse inévitable des températures. Avec 197 parties, la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) jouit d'une adhésion presque universelle.

La CCNUCC met en place **un cadre global de l'effort intergouvernemental** pour faire face au défi posé par les changements climatiques.

2.4. Le Protocole de Kyoto

Lorsqu'ils adoptèrent la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), les gouvernements savaient que leurs engagements ne seraient pas suffisants pour sérieusement faire face aux changements climatiques. En 1995, dans une décision connue sous le nom de Mandat de Berlin, les parties à la Convention entamèrent un cycle de négociations en vue de décider des engagements plus solides et plus détaillés pour les pays industrialisés. Après deux années et demie d'intenses négociations, **le Protocole de Kyoto fut adopté au Japon, le 11 décembre 1997**. Le Protocole de Kyoto a été ratifié par 172 pays et est entré en vigueur depuis 2005. Il pose une limite aux grandes économies mondiales sur le rejet total des émissions de gaz à effet de serre (GES, en anglais GHG). Une première période d'engagements allait de 2008 à 2012. La **seconde période** d'engagement a démarré le 1^{er} janvier 2013 et va jusqu'en 2020. Le Protocole compte aujourd'hui 192 parties.

Le Protocole de Kyoto avait fixé des objectifs de réduction significative des émissions de GES légalement contraignants pour les pays industrialisés signataires. Ces pays avaient pris collectivement le ferme engagement de réduire sur la période **2008-2012** leurs émissions de 5 % par rapport aux niveaux de 1990. Il s'agit du Canada (- 6 %), du Japon (- 6 %), de la France (0 %), de l'Union européenne (- 8 %), de la Nouvelle Zélande (0 %) et de l'Australie (- 8 %). Précisons que cet accord n'a concerné que six GES : le dioxyde de carbone (**CO₂**), le méthane (**CH₄**), le protoxyde d'azote (**N₂O**), les hydrofluorocarbones (**HFC**), l'hexafluorure de soufre (**SF₆**) et les hydrocarbures perfluorés (**PFC**).

Les principales mesures suggérées par le Protocole concernent les émissions de CO₂ énergétiques (transport, industrie, production d'énergie, habitat) et celles liées à la déforestation. Les émissions de CH₄ et N₂O directes en agriculture (élevage et culture) étaient négligées, bien que ce secteur était la principale source d'émissions de GES dans certains pays comme le Brésil, l'Argentine et la Nouvelle-Zélande (30-50 % du total national). Les actions de réduction en agriculture étaient traitées à travers la coopération technologique (échanges bilatéraux et multilatéraux sur les pratiques agricoles, soutien à des programmes de recherche). Les thématiques « agriculture » et « changements climatiques » ont fait partie des mesures d'adaptation. Les PANA³² avaient développé des stratégies de développement agricole ayant contribué à réduire les vulnérabilités aux impacts présents et futurs des changements climatiques.

32 Programmes d'action nationaux d'adaptation.

Les conditions à respecter par les pays industrialisés pour comptabiliser les émissions de GES liées au CAS³³, et évaluer les éventuels puits de carbone des sols et forêts étaient précisées. Ce volet UTCF³⁴ ou en anglais LULUCF³⁵ couvre la récolte et l'accroissement forestier, les prairies, la conversion des forêts (défrichement) et les sols riches en carbone sensible à la nature des activités. Il représente une part importante du bilan des émissions de GES dans certains pays. **En France, par exemple, les émissions de CO₂ avaient baissé de 7 % entre 1990 et 2006 en intégrant l'UTCF, mais celles-ci avaient augmenté de 2 % hors UTCF.** L'article 3.4 avait permis à certains pays de comptabiliser les activités qui contribuent à la séquestration du carbone autres que celles couvertes par l'article 3.3 comme l'amélioration de la couverture végétale (gestion des forêts, terres agricoles et pâturages).

De même, le Mécanisme pour un développement propre (MDP) a permis aux pays industrialisés de réaliser des projets réduisant les émissions de GES dans les pays en développement (PED). En retour, ces émissions étaient comptabilisées par les pays industrialisés, remplissant ainsi leur propre objectif de réduction d'émissions de GES. Ce dispositif avait favorisé la coopération d'instruments de financement de l'atténuation à l'international, en particulier en agriculture. Par exemple, plusieurs projets de traitement de déjections porcines et de substitution d'énergie fossile par du biogaz agricole avaient été développés en Inde, au Mexique, au Chili et en Thaïlande. Cependant, le MDP a rencontré des difficultés concernant le secteur agricole. **Un projet MDP doit prouver la réduction effective d'émissions de GES dans un PED avant de donner droit à des crédits « carbone ».** La séquestration de carbone ne générerait pas de crédits « carbone » de façon automatique, car temporaire, risquée, faiblement documentée et difficile à mesurer. Le MDP est l'une des opportunités saisies par certains pays d'Afrique en matière de projets.

En décembre 2009 à Copenhague avait eu lieu la 15^e Conférence des parties (COP) qui avait jeté les bases d'après 2012 marquant la fin de la première période d'engagement du Protocole de Kyoto. Aucun accord n'avait abouti à cause des désaccords sur les objectifs de réduction d'émissions et les financements à apporter aux pays les plus pauvres pour le développement sobre en carbone. La décision finale a été **une feuille de route non contraignante** permettant quand même de rester à moins de 2 °C.

D'intéressantes propositions avaient vu le jour **pour réduire ou prévenir les émissions de GES en agriculture**, avec une meilleure coopération de recherche sur l'atténuation, l'adaptation, le transfert de technologies, pratiques et procédés. Un programme de travail sur les questions de méthodologie et les approches de politiques agricoles a été abordé afin d'inclure pleinement ces aspects dans le régime post 2012. Un réseau mondial comme « GRAG³⁶ » avait favorisé d'importants investissements et la coordination dans la recherche sur l'atténuation des GES agricoles. En 2010, un programme de travail sur l'agriculture a concerné les questions scientifiques, méthodologiques et techniques liées à l'exécution d'actions d'atténuation et d'adaptation, faisant de ce secteur l'un des plus importants.

33 Changement d'affectation des sols.

34 Utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie.

35 *Land Use, Land Use Changes and Forestry*.

36 *Global Research Alliance on Agricultural Greenhouse Gases*.

2.5. L'Accord de Paris

L'Accord de Paris fait suite aux négociations qui se sont tenues lors de la Conférence de Paris sur le climat (COP21) de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Cet accord rentre dans le cadre de la deuxième période d'engagement des parties de la CCNUCC et du Protocole de Kyoto pour poursuivre la lutte contre les changements climatiques, intensifier les actions et les investissements d'un avenir durable à faible intensité de carbone. Il a rassemblé pour la première fois toutes les nations en vue des efforts ambitieux pour le climat avec un soutien accru d'aider les PED. Ouvert à la signature le 22 avril 2016 (Jour de la Terre) à New York au siège des Nations Unies, il est entré en vigueur le 4 novembre 2016. Ce jour-là, le « double seuil » (ratification par 55 pays représentant au moins 55 % des émissions mondiales) était atteint. Depuis lors, davantage de pays ont ratifié l'accord et continuent de le faire, atteignant au 26 août 2019 un total de **183** sur les 197 parties à la Convention.

Dans le cadre de cet accord, les parties se sont engagées à prendre des mesures ambitieuses pour maintenir l'élévation de la température mondiale en dessous de 2 °C d'ici à la fin du siècle. Il vise à accroître la capacité des pays à faire face aux impacts du changement climatique et à rendre les flux financiers compatibles avec un faible niveau d'émissions de GES. Il est important de mobiliser et d'affecter des ressources financières conséquentes. Un nouveau cadre technologique et un renforcement des capacités sont nécessaires pour appuyer l'action des PED, notamment les plus vulnérables dans un cadre de transparence accrue pour l'action et le soutien.

Toutes les parties devront présenter des contribution déterminées au niveau national (CDN) et renforcer leurs efforts, accompagnés des comptes rendus réguliers de leurs émissions et des efforts de mise en œuvre. Un bilan mondial sera dressé tous les cinq ans et permettra d'évaluer les progrès collectifs accomplis. Afin de rendre opérationnel l'accord, un programme de travail a été lancé pour élaborer des modalités, procédures et directives, dont certains aspects sont :

- objectif à long terme en matière de température (art. 2) ;
- plafonnement mondial des émissions et « neutralité climatique » (art. 4) ;
- atténuation (art. 4) ;
- puits et réservoirs (art.5) ;
- coopération volontaire/démarches fondées et non fondées sur le marché (art. 6) ;
- adaptation (art. 7) ;
- pertes et préjudices (art. 8) ;
- appui au financement, à la technologie et au renforcement des capacités (art. 9, 10 et 11) ;
- éducation au changement climatique, formation, sensibilisation du public, participation et accès à l'information (art. 12) ;
- transparence (art. 13) ;
- mise en œuvre et respect des dispositions (art. 15) ;
- bilan mondial (art. 14) ;
- décision 1/CP.21.

Le Fonds vert pour le climat (FVC, en anglais *Green Climate Fund*) est une entité chargée du fonctionnement du mécanisme financier de la COP. Il est le plus récent à faire son entrée dans l'architecture multilatérale de financement du climat, de l'adaptation et de l'atténuation à parts égales (50 %). Opérationnel depuis 2015, il est le plus grand fonds multilatéral sur le climat et est destiné à mobiliser des financements considérables au fil du temps. Toutes les activités à faible émission de GES sont éligibles. Plusieurs projets ont été déjà approuvés et d'autres en étude.



2.6. Un sommet mondial sur le climat 2019

En septembre 2019, le secrétaire général, António Guterres, a organisé un Sommet sur le climat avec les dirigeants mondiaux des gouvernements, du secteur privé et de la société civile afin de soutenir le processus multilatéral ainsi que d'accroître et d'accélérer l'action et les ambitions climatiques. Il a nommé Luis Alfonso de Alba, ancien diplomate mexicain, en tant qu'envoyé spécial pour diriger les préparatifs.

Le sommet s'est concentré sur les secteurs clés dans lesquels l'action peut faire la plus grande différence – industrie lourde, solutions basées sur la nature, villes, énergie, résilience et financement climatique. Les dirigeants du monde devaient y présenter un état des lieux de leurs actions et sur ce qu'ils ont l'intention de faire de plus lorsqu'ils se réuniront en 2020 pour la conférence des Nations Unies sur le climat, où les engagements seront renouvelés et pourront être approfondis.

3. LES CYCLES DE CARBONE ET DE L'AZOTE

3.1. Flux de carbone en « culture » et « écosystème »

Le dioxyde de carbone CO_2 est l'un des éléments clés du cycle de la vie terrestre. Il constitue, avec la vapeur d'eau et la lumière, les premiers maillons de la matière vivante. Initiateur de la vie, il est aussi le produit final de sa dégradation. En effet, les végétaux chlorophylliens (cultures, forêts...) absorbent une quantité du CO_2 contenu dans l'atmosphère par le processus de la photosynthèse (Figure 6). La quantité de carbone ainsi assimilée pour ses besoins de fonctionnement (maintenance, croissance et énergie) est dénommée **production primaire brute (GPP)**.

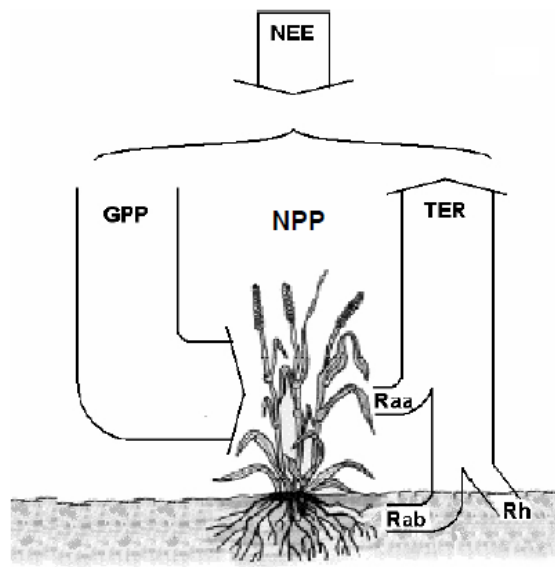


Figure 6 – Représentation des flux de CO_2 échangés entre une culture et l'atmosphère (Moureaux, 2008)

Par ailleurs, l'écosystème (plante et sol) va réémettre du CO_2 dans l'atmosphère par le processus de la respiration. Ce flux désigne la somme de la respiration des parties aériennes de la plante (R_{aa}), celle des racines (R_{ab}) et des émissions de CO_2 provenant de la décomposition de la matière organique (R_h). **La respiration totale de l'écosystème (TER) représente la somme de ces flux.**

L'échange net de l'écosystème (NEE) représente le bilan de ces deux flux importants, mais opposés (GPP et TER) entre l'atmosphère et la culture ou l'écosystème.

Une **partie du CO_2 assimilé** appelée **production primaire nette (NPP) est stockée dans la végétation**. En dehors des échanges écosystème-atmosphère, des exportations C_{Exp} (prélèvement, exploitation de bois, récolte, pâture...) ou importations du carbone C_{Imp} (apport d'engrais chimique ou organique, fumier..) peuvent s'effectuer.

Le bilan de **tous les flux de carbone** (GPP, TER, C_{Imp} , C_{Exp}) désigne la **productivité brute du biome (NBP)**. Finalement, les termes importants sont obtenus par les expressions suivantes :

$$NEE = NPP + R_h ; NEE = GPP + TER ; NBP = NEE + C_{Imp} + C_{Exp}$$

Ces équations sont **à la base de la conception des techniques ou méthodologies pour mesurer ou approcher par estimation les échanges de CO_2 entre l'atmosphère et un écosystème terrestre** (Ago *et al.*, 2016). Par convention, les flux entrants dans

l'écosystème sont comptés négatifs (affectés du signe -) et sortants positifs (affectés du signe +). Le signe de NBP ou NEE en fonction des auteurs détermine le comportement de l'écosystème sur une période donnée, généralement une année : « **puits** » de carbone si $NBP < 0$; « **source** » si $NBP > 0$ et en équilibre si $NBP = 0$. Les forêts, océans, prairies, savanes se comportent comme des « **puits de carbone** », du moins jusqu'à ce qu'ils atteignent un nouvel équilibre. Quant aux agrosystèmes, ils se comportent comme des puits, mais également comme des sources de carbone en fonction notamment des degrés des perturbations anthropiques et leurs impacts sur les flux de carbone.

3.2. Le cycle global de carbone

Le cycle global de carbone est constitué des échanges de carbone entre les grands réservoirs : les océans, l'atmosphère et les écosystèmes terrestres (ressources fossile, biomasse et sol). Il comprend les échanges atmosphère-biosphère et océan-atmosphère (Figure 7).

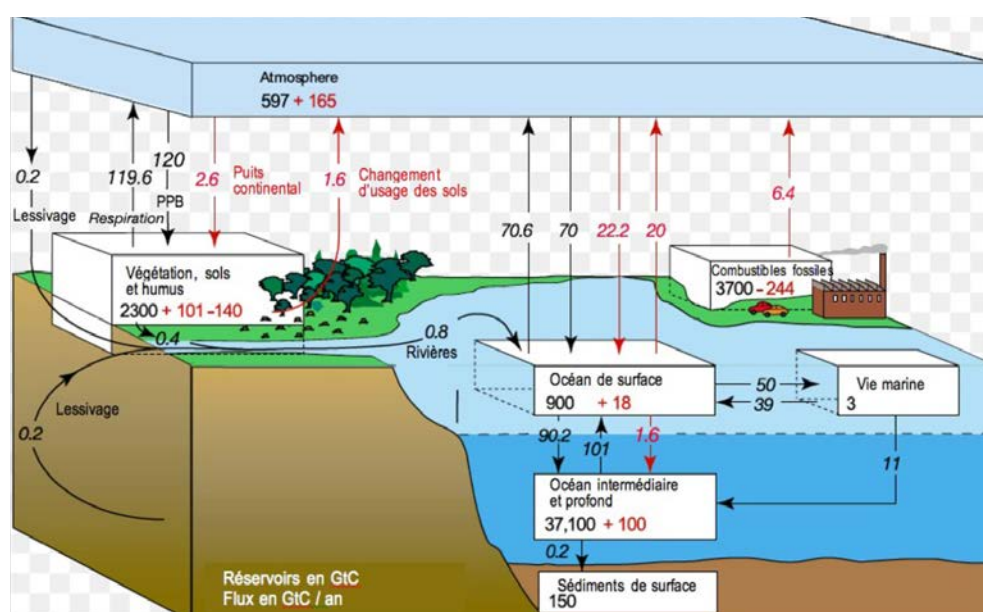


Figure 7 – Représentation des stocks de carbone estimés et les principales perturbations du cycle global de carbone causées par les activités anthropiques. Les flèches rouges représentent les flux supplémentaires dus aux activités humaines, moyennés sur la période 2000-2009 et les flèches les flux « naturels » à l'équilibre (GIEC, 2013)

Le carbone circule dans des proportions variables entre les différents réservoirs. Particulièrement, un double flux est observé entre l'atmosphère et la biomasse terrestre : la photosynthèse et la respiration. En effet, par le processus de photosynthèse, les végétaux chlorophylliens absorbent du CO_2 contenu dans l'atmosphère qu'ils assimilent pour leurs besoins de fonctionnement (maintenance, croissance et énergie). Une partie de ce carbone est **transférée aux êtres vivants** (y compris l'homme) **qui se nourrissent de végétaux**, tandis que l'autre partie est incorporée au sol à travers les excréments et la mort des êtres vivants. Le carbone incorporé au sol **intègre ensuite l'humus** via l'activité des micro-organismes. Les émissions du CO_2 par les écosystèmes terrestres se réalisent par les processus de respiration (hétérotrophe et autotrophe). Ces deux flux importants de même ordre de grandeur, mais de sens opposés, constituent les moteurs des échanges de CO_2 entre la biosphère et l'atmosphère.

Une partie du carbone des profondeurs des écosystèmes terrestres se transforme en hydrocarbures à l'échelle de dizaines de milliers d'années, en constituant les réserves d'énergie fossile (gaz, pétrole, charbon). Les océans absorbent également le carbone, principalement par dissolution sous la forme de bicarbonate et par photosynthèse de la flore marine.

Il faut noter qu'une partie du méthane CH_4 émis est oxydé une fois dans l'atmosphère et rapidement transformé en CO_2 . **Le méthane (CH_4) provient généralement de l'élevage, des tourbières, des rizières et des décharges.**

À l'état naturel, le cycle global de carbone est relativement en équilibre. Ces dernières décennies, les émissions anthropiques de CO_2 constituent une composante importante du cycle global du carbone (GIEC, 2013). En 2017, les émissions anthropiques totales de CO_2 de la planète étaient évaluées à $11,3 \pm 0,9$ Gt, dont 24 % étaient absorbés par les océans, 31 % par les écosystèmes terrestres et 45 % restés dans l'atmosphère (Le Quere *et al.*, 2018), renforçant davantage le réchauffement climatique.

3.3. Le cycle de l'azote

L'atmosphère est constituée d'environ 78 % d'azote (N), un des éléments indispensables aux vivants, car il se trouve dans les protéines. Le cycle de l'azote est constitué de plusieurs processus combinant les actions d'une multitude de bactéries (Figure 8).

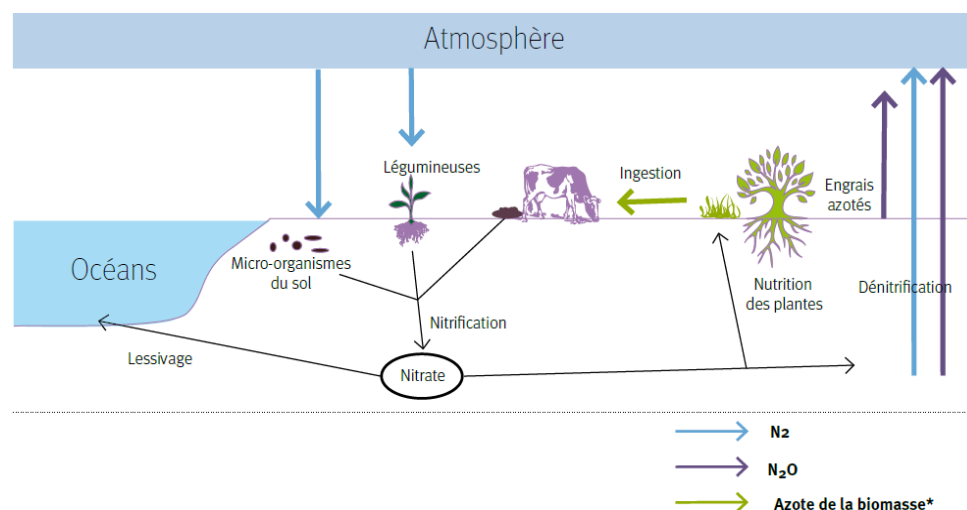


Figure 8 – Le cycle de l'azote : explication des diverses émissions dans l'atmosphère (Vandaele *et al.*, 2010)

La fixation de l'azote atmosphérique (N_2) par les végétaux via les bactéries dans le sol ou les légumineuses (soja, haricot, niébé, vande, lentilles, cajanus, mucuna...). Il est converti en azote minéral (NH_4^+) avant d'être assimilé par les organismes vivants. Ces végétaux, très riches en azote, sont utilisés dans l'alimentation humaine et animale (flux direct d'azote). Il faut préciser que le NH_4^+ adsorbé sur les complexes argilo-humiques ou en solution dans le sol est le plus souvent transformé en ammoniac (NH_3). L'azote consommé retourne au sol à la mort des êtres vivants ou par les excréments.

La nitrification, processus qui transforme les produits de la fixation (NH_4^+ , NH_3) en NO_x (ex.: nitrates, NO_3^-) dans des sols pauvres en oxygène (O_2) grâce à certaines bactéries, rendant ainsi l'azote assimilable par les êtres vivants.

Nitrification : NH_4^+ (nitrosomas) \leftrightarrow NO_2^- (nitrobacter) \rightarrow NO_3^- (nitrates)

La dénitrification, qui produit de nouveau de l'azote atmosphérique sous sa forme moléculaire (N_2) avec comme produits secondaires de cette réaction le dioxyde de carbone CO_2 et de l'oxyde nitreux N_2O .

Dénitrification : $\text{NO}_3^- \leftrightarrow \text{N}_2\text{O} / \text{N}_2$ (oxyde nitreux / diazote)

Ces processus sont néanmoins très lents, et l'apport excessif d'engrais azotés et d'effluents agricoles pourraient limiter les processus d'assimilation de l'ammonium NH_4^+ , de l'ammoniac NH_3 et des nitrates NO_3^- (formes d'ionisation les plus communes des fertilisants azotés).

4. LES SOURCES PRINCIPALES DES GES DANS LE SECTEUR DE L'AGRICULTURE

4.1. Origine des émissions de GES

Les émissions des GES, principalement le CO_2 , le CH_4 et N_2O observées en agriculture proviennent de l'amont, l'intérieur et l'aval des exploitations (Figure 9).

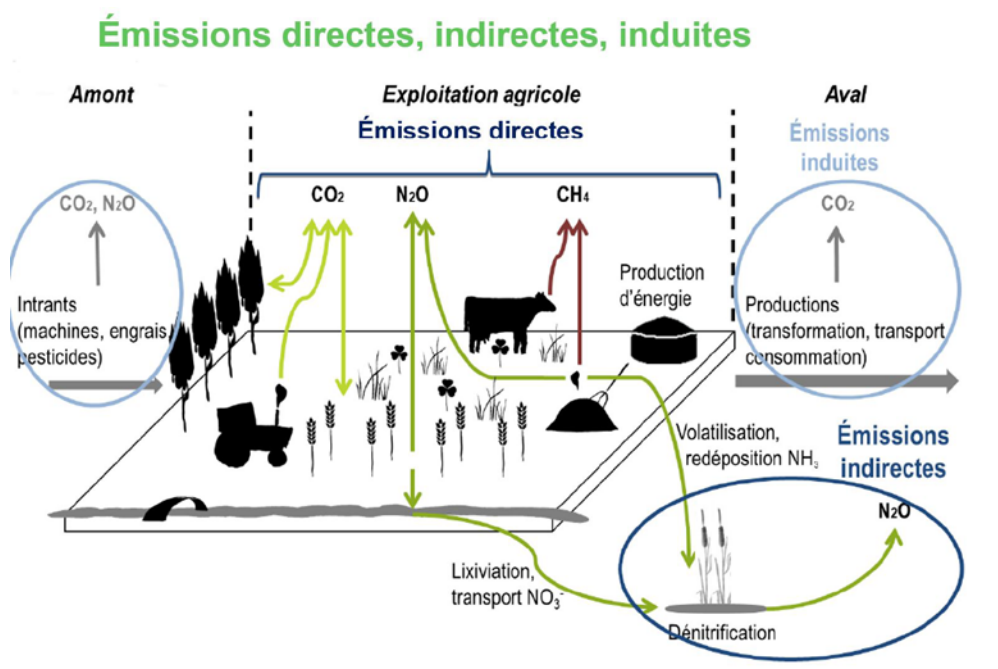


Figure 9 – Les principales sources d'émissions de GES en agriculture (Pellerin, 2017)

Elles concernent principalement les productions végétale et animale, les industries agro-alimentaires, l'utilisation d'engrais, le traitement phytosanitaire et le transport. En particulier, les principaux postes responsables sont la **fermentation entérique** (CH_4), les **apports azotés aux sols agricoles** (N_2O), la **gestion et le stockage des effluents d'élevage** (CH_4 , N_2O), le **brûlage de la biomasse ou des résidus agricoles** (CO_2 , CH_4 , N_2O), le **traitement phytosanitaire** (CO_2), la **conversion des prairies en terres agricoles** (CO_2 , CH_4 , N_2O), la **riziculture** (CH_4) et le **transport** (CO_2).

Dans les PED (notamment les pays ACP), très peu d'expérimentations, d'études et de mesures sont conduites sur l'évaluation des émissions des GES en agriculture. Les analyses sont en majorité plus qualitatives que quantitatives (FAO, 2017). Les raisons de la situation sont multiples et concernent :

- (i) l'insuffisance de programmes de recherches d'évaluation des pratiques ;
- (ii) l'insuffisance de capacités des différents acteurs ;
- (iii) le défaut de financement conséquent dans le secteur. Cependant, des efforts louables sont de plus en plus enregistrés et nécessitent d'être appuyés. La quantification des émissions et des impacts aideront à mieux discuter les actions d'atténuation et d'adaptation à retenir dans le secteur. La prise en compte de l'analyse coûts-bénéfice des différentes pratiques serait aussi déterminante à toutes les étapes concernées.

En Afrique de l'Ouest, les émissions moyennes de CH_4 s'élèvent à 7 200 000 kg par saison dans les rizicultures (Djaby et Ozer, 2013). Le SRI³⁷ a réduit l'émission de CH_4 , mais a augmenté celle de N_2O dans les systèmes de grande utilisation de fumier. Au Bénin, 68 % environ des émissions totales de GES proviennent de l'agriculture (CCNUCC, 2013). En 2015, les émissions totales agricoles étaient évaluées à 4 863,69 Gg CO_2 eq (PRBACC, 2018). La fermentation entérique représente au Bénin la plus grande contribution aux émissions de GES avec 56,47 % du total. Elle est suivie des sols cultivés (36,51 %), de la gestion du fumier (3,97 %), de la riziculture (1,96 %), de la combustion des résidus de cultures (0,83 %) et de l'application d'urée (0,26 %). Si on considère les trois principaux GES (CO_2 , N_2O et CH_4), les émissions de méthane dominant largement avec 61,47 % du total contre 38,27 % pour l'oxyde nitreux et 0,26 % pour le dioxyde de carbone. Cette importance du méthane résulte de celle de la fermentation entérique et de la gestion du fumier.

4.2. Le dioxyde de carbone CO_2

Les émissions de carbone en agriculture sont principalement dues à l'utilisation d'engins (carburant), aux pratiques agricoles et à la conversion des écosystèmes naturels (forêts, savanes, prairies...) en parcelles agricoles.

4.2.1. La consommation d'énergie

Le fonctionnement des engins/appareils et le chauffage des serres ou bâtiments d'élevage dans les exploitations agricoles consomment du carburant (énergie fossile), source d'émission de CO_2 . Les émissions dépendent des types de cultures, régions, niveaux de développement et de mécanisation du secteur agricole. Par exemple, en France, ce poste représente environ 80 % des émissions de CO_2 en agriculture. En Afrique, où le secteur agricole est moins mécanisé, elle serait beaucoup plus faible.

4.2.2. Les différentes pratiques agricoles

L'apport d'engrais organiques ou minéraux au sol agricole peut favoriser l'émission de CO_2 (Fontaine *et al.*, 2003). Au Sud du Ghana, McCarthy *et al.* (2018) ont mis en évidence l'influence du management et du système d'utilisation de la terre sur les émissions de CO_2 dans les sols des agro-systèmes. Ces auteurs avaient rapporté le contrôle des émissions de CO_2 par la minéralisation et la décomposition de la matière organique.

Au Bénin, une étude comparative de l'impact de la matière organique en maraîchage a révélé une influence positive sur les émissions de CO_2 du sol (Akpo, 2017). L'auteur a observé des émissions de 0,51-0,71 g $\text{CO}_2\text{-C}/\text{m}_2/\text{h}$ pour les fientes de volaille, 0,68-0,95 g $\text{CO}_2\text{-C}/\text{m}_2/\text{h}$ pour les déjections des petits ruminants et 0,32-0,42 g $\text{CO}_2\text{-C}/\text{m}_2/\text{h}$ pour les bouses de vache. Par ailleurs, l'étude n'a montré aucun impact de la fertilisation minérale sur les émissions de CO_2 du sol.

Dans ce même pays, Dossou-Yovo *et al.* (2016) ont observé une hausse des émissions du CO_2 du sol avec le *mulch* (pailles de riz) et la fertilisation, allant jusqu'à 0,136g de $\text{CO}_2\text{-C}/\text{m}_2/\text{h}$ à partir des mesures de respiration du sol dans des parcelles de riz pluvial. Le semis direct sans labour a réduit les émissions, comparé au labour manuel.

Au Kenya, le pâturage du bétail a réduit les émissions de CO_2 du sol dans la savane tropicale de Lambwe (Ondier *et al.*, 2018).

-En Belgique, les travaux de Buysse *et al.* (2017) avaient fait état d'une perte de $1,05 \pm 0,22 \text{ kg C/m}^2$, soit 17 % du stock d'1 m de profondeur après 12 ans de rotation de cultures. Ces auteurs ont conclu que le labour n'est forcément pas une source d'émissions de CO_2 du sol pendant les périodes d'inter-cultures.

-Un autre travail en France sur le site de Boigneville avait pu montrer une baisse globale des émissions du CO_2 du sol de 11 % en « TCS³⁸ travail superficiel » et de 16 % en « semis direct ». En effet, le travail du sol a un effet sur les caractéristiques physico-chimiques du sol agricole. Cette opération consiste en fait à retourner les premiers parties du sol (surtout 15 à 30 cm) avec pour objectifs de :

- répartir la fumure et les amendements dans la couche arable,
- contrôler les adventices,
- enfouir les résidus de récolte, les débris végétaux et les apports organiques,
- rendre la couche de surface très meuble,
- améliorer le ressuyage des terres humides ou drainées,
- détruire les cultures intermédiaires et réchauffer le sol.

Par ailleurs, le labour ne déstocke pas forcément le carbone du sol (Baket *et al.*, 2007). Cependant, la gestion des cultures telles que l'élimination des résidus joue un rôle important dans le stockage du carbone. Cette capacité de séquestration peut évoluer dans le temps en fonction des zones du profil pédologique (Dimassi *et al.*, 2014). Dans les agrosystèmes, les facteurs pédo-climatiques influencent les **émissions de CO_2** du sol (Ago, 2016 ; Dimassi *et al.*, 2014). Il est donc trop tôt pour conclure sur le potentiel de stockage de carbone des pratiques culturales uniquement dans une région donnée.

Les déjections peuvent contribuer à l'émission du CO_2 en fonction des conditions pédo-climatiques. Par ailleurs, les techniques de GDT peuvent améliorer le stock de carbone du sol, et encore plus en condition de travail du sol sans labour (Arrouays *et al.*, 2002).

4.2.3. Le sol et la végétation

La minéralisation de la matière organique du sol et le processus de respiration des écosystèmes sont d'importantes d'émission du CO_2 . La conversion des écosystèmes naturels (savanes, prairies, forêts...) en terres agricoles déstocke le carbone, représentant 17 % des émissions mondiales de GES.

4.3. Le protoxyde d'azote N_2O

Les émissions de N_2O **proviennent de l'épandage de l'azote sur les sols agricoles** nécessaire à la croissance et au développement harmonieux des cultures. L'agriculteur fait ces compléments d'azote sous forme d'engrais organique (fumier, lisier, résidus de cultures...) ou minéraux de synthèse (produit obtenu d'un processus industriel entre l'azote et l'hydrogène). On distingue les **émissions directes de N_2O** provenant directement des sols lors de l'épandage d'azote et les émissions **indirectes de N_2O** résultant de la perte d'une partie de l'azote appliqué du fait de sa volatilisation et de son lessivage.

38 Techniques culturales simplifiées.

On enregistre aussi des émissions de N_2O au niveau de l'élevage. Elles sont dues aux processus de nitrification/dénitrification pendant le séjour d'animaux et le stockage des déjections. En fonction des types de déjection (lisier ou fumier), des taux d'oxygène et d'humidité, ces émissions sont complexes et variées. Elles sont corrélées aux quantités d'azote épandues, à la forme de l'azote apporté (urée, nitrate, ammonitrate), à la forme de l'engrais (solide ou liquide), à la technique utilisée, à la culture et aux conditions pédo-climatiques (type de sol, humidité, température, vent...). Une étude effectuée par Solagro en 2003 avait montré que les émissions de N_2O connaîtraient en France 20 % de baisse avec la réduction de l'excédent azoté sur les sols agricoles.

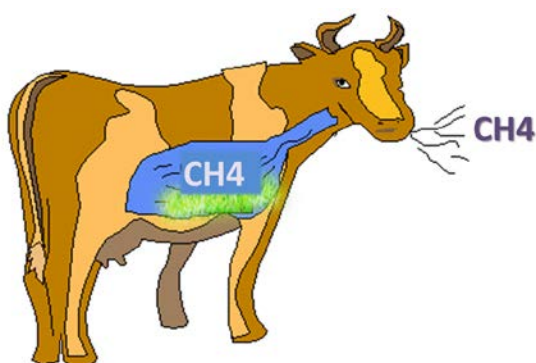
La tendance générale est la hausse des émissions de protoxyde d'azote en TCSL³⁹ avec des écarts de 0 à 5 kg N- N_2O /ha/an (Nicolardot et Germon, 2008 ; Oorts, 2006). La densité apparente du sol (plus élevée) limite les transferts gazeux en favorisant la dénitrification. Un autre essai à Boigneville a fait état de légères émissions en semis direct par rapport au labour avec un écart moyen de 0,5 kg N- N_2O /ha/an (Oorts, 2006).

4.3. Le méthane CH_4

4.3.1. Les ruminants

Les émissions de CH_4 sont issues de la **fermentation entérique** (notamment chez **les ruminants**), de la gestion des déjections animales et des rizicultures. En effet, le mécanisme particulier de digestion des ruminants (bovins, ovins, caprins) est responsable des émissions de méthane d'origine agricole. Ce sont des émissions après la fermentation des aliments ingérés du rumen (fermentation entérique), influencées par plusieurs facteurs comme la race, le type génétique, le niveau de production animale, l'activité physique, la composition et la digestibilité des aliments.

Par exemple, les émissions de CH_4 augmentent avec l'âge et le niveau de production (lait ou viande) chez les bovins.



L'alimentation des animaux joue un rôle primordial dans les émissions de méthane. Les rations sèches (contenant plus de 80 % d'aliments concentrés à base de céréales, de foin ou de paille) réduisent la fermentation entérique.

Dans tous les cas, il est nécessaire de faire la distinction entre les différents systèmes d'élevage (p. ex., l'élevage intensif ou l'élevage en pâturage) et les différents types d'animaux, car les émissions de GES diffèrent entre les systèmes d'élevage et les types de viande produits.

Les bovins demeurent les ruminants les plus émetteurs de méthane, avec une moyenne annuelle de 62,3 kg de CH_4 /animal. En Afrique de l'Ouest, les émissions de CH_4 en 2017 issues du cheptel bovin seul ont été estimées à 24 534 442,8 kg (Djaby et Ozer, 2013). Il existe cependant au sein des différentes espèces des variations importantes.

4.3.2. La gestion des déjections animales

La fermentation des déjections animales (fumiers, lisiers) induit également des émissions importantes de méthane. Cela se produit souvent lorsque les déjections sont entassées en condition d'anaérobie. Ces émissions sont souvent importantes durant les périodes de stabulation. Les modes de stockage sous forme liquide semblent les plus émetteurs de méthane.

Il faut noter que le lisier et le fumier ne provoquent pas des émissions identiques pendant le stockage à cause de leurs compositions respectives en matière organique. En effet, le fumier peut engendrer des émissions de méthane plus importantes en condition d'anaérobie à partir de l'apport de paille. Le lisier stocké en fosse se trouve souvent en condition anaérobie favorable aux émissions de CH_4 . Pour le fumier, les émissions dépendent de la gestion de la litière (accumulée ou raclée) qui provoque ou non les conditions anaérobies nécessaires aux émissions de CH_4 . Une partie des émissions provient également des déjections de bovins, porcins et à un niveau plus modeste, des volailles.

4.3.3. Les sols agricoles, notamment les rizières

L'état des lieux de la recherche a montré des flux faibles et négatifs, indiquant l'absorption du gaz par la microflore du sol qui l'oxyde. Cette consommation semble plus importante en sols non cultivés que ceux cultivés et fertilisés. Cependant, l'impact du travail du sol sur le flux de méthane n'a pas été très étudié. Peu de différences ont été néanmoins notées au niveau des capacités d'absorption (Vanterea *et al.*, 2005). Une autre synthèse bibliographique avait pu montrer que les sols en TCSL oxydent le méthane avec des écarts très réduits, de l'ordre de 0,4 kg C- CH_4 /ha/an (Nicolardot et Germon, 2008 ; Six *et al.*, 2002).

La rizière est une autre importante source de production et d'émission de méthane. La disponibilité de l'eau en excès limite la circulation de l'oxygène dans le sol et favorise la production de méthane.

5. LES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE CALCUL DES GES DANS LE SECTEUR DE L'AGRICULTURE

Dans le secteur agricole, plusieurs méthodologies sont utilisées pour l'estimation des émissions de GES dont celles proposées par le GIEC. Les nomenclatures des inventaires, les procédures et les règles de calcul sont évolutives en tenant compte des avancées scientifiques. Les « lignes directrices » ont été publiées en 2006 et une mise à jour très récente a été publiée en 2019. Elles servent pour l'appui de la préparation d'inventaires nationaux (rapports des pays ayant ratifié la CCNUCC).

Les **méthodes sont essentiellement basées sur les facteurs d'émissions** (FE), les résultats des travaux de recherche (champs ou laboratoire), **les statistiques** et **les modèles** (modélisation biophysique).

Dans l'évaluation des émissions de CH₄ et de N₂O, il est tenu compte des émissions directes et indirectes. Pour le CO₂, **on intègre par contre les changements d'usage** ou non. Malgré tout, certains pays ont adopté d'autres dispositions particulières en fonction des engagements particuliers.

Le bilan global de GES dans le secteur de l'agriculture est donné par l'expression suivante :

$$E = AD \times FE$$

où :

- E est l'émission exprimée en kg CO₂ eq/ha,
- AD désigne les données d'activité,
- FE désigne les facteurs d'émissions.

Il faut noter que des **valeurs par défaut de FE ont été publiées** dans les directives du GIEC..., mais elles peuvent également être déterminées pour chaque culture en fonction de la précision recherchée, des types d'écosystèmes et des spécificités des régions ou pays.



Trois principales étapes permettent d'évaluer les émissions des GES.

1. Identifier les sources d'émissions par catégorie socio-économiques (énergie, agriculture, nature, transport...)
2. Estimer les facteurs d'émission (FE) (par défaut, culture, modélisation...)
3. Estimer les intrants (statistiques économiques régionales ou nationales)

Par ailleurs, les mesures des flux des GES sur site ou au champ sont réalisées à l'aide de techniques et instruments relativement adaptés. On distingue des dispositifs micro-météorologiques, des tunnels de ventilation et des enceintes statistiques automatisées. Plusieurs bilans de GES ont été déjà établis dans le secteur de l'agriculture dont quelques exemples sont montrés à la Figure 10 et dans le Tableau 3.

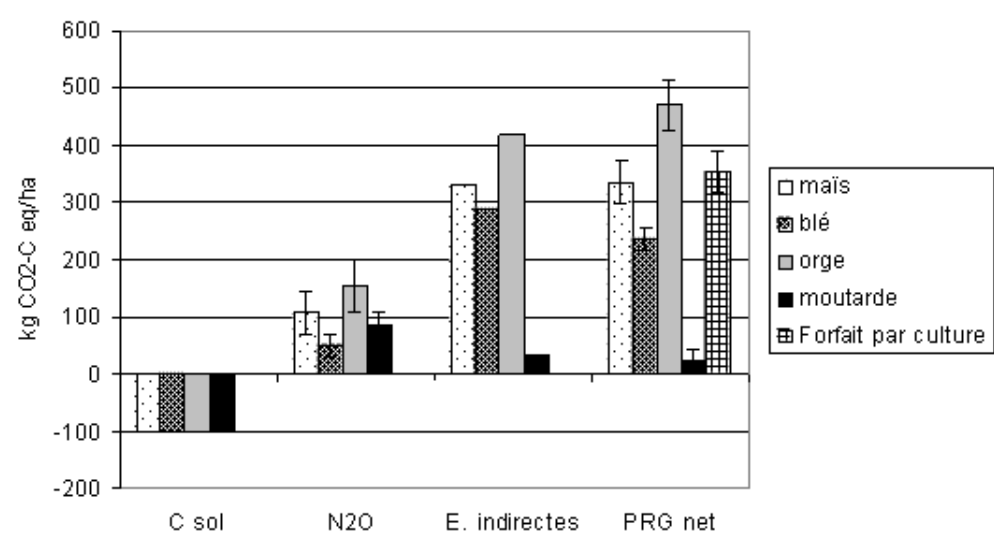


Figure 10 – Bilan annuel de GES (350±35 Kg CO₂-C eq/ha) à l'échelle d'une rotation (Lehuger, 2006)

PRG net = Δstock C sol + N₂O + émissions indirectes

Tableau 3 – Bilan de GES (kg CO₂/ha/an) en fonction de 3 modes de travail du sol sur le site de Boigneville en France (Labreuche *et al.*, 2007)

Type d'émission	Semis direct	Travail superficiel	Labour
Émissions liées à la conduite des cultures	2 047	2 323	2 340
Émission/stockage par le sol	-70	-136	11
Bilan d'émissions de GES	1 978 (84,1 %)	2 087 (88,8 %)	2 351 (100 %)

L'agriculture contribue de façon significative à l'augmentation continue des concentrations des GES, mais demeure l'un des secteurs les plus impactés par le réchauffement climatique.

Dans le contexte de développement durable, la mise en œuvre de mesures pertinentes d'atténuation, de résilience et d'adaptation est indispensable. Les émissions de GES de la littérature sont plus souvent obtenues à partir des méthodes indirectes (estimations, modèles).

Les émissions de GES en agriculture **restent complexes et difficiles à appréhender**. D'autres facteurs pèsent également dans les décisions de progrès, comme les difficultés des producteurs à changer de paradigme en termes de pratiques. Un accent devra être mis sur les recherches scientifiques afin de contribuer significativement à affiner les mesures des émissions des GES, mieux comprendre les mécanismes contrôlant leurs échanges et réduire les incertitudes sur les résultats. Les pays en développement (ACP en particulier), où les données statistiques, les projets de recherche sur le climat et ses impacts sont encore plus rares, ont besoin d'appuis aussi bien techniques que financiers afin de renverser les tendances.



Chapitre 4

Impacts des pratiques agricoles sur la qualité de l'air et stratégies d'atténuation

Pratiques agricoles et émissions de GES	88
Possibilités d'atténuation et de compensation des émissions	105
Nécessité d'évaluations holistiques et d'une approche systémique	114

Objectifs pédagogiques

À l'issue de ce chapitre, l'apprenant sera capable :

- Comprendre que l'horticulture contribue aux émissions de GES à toutes les étapes de la chaîne d'approvisionnement
- Connaître les principales sources d'émissions de GES dans la production agricole et les chaînes d'approvisionnement horticoles
- Connaître l'importance relative des différentes sources d'émissions de GES et les facteurs qui influencent les émissions
- Comprendre que l'agriculture et l'horticulture peuvent contribuer aux efforts d'atténuation du changement climatique
- Identifier les opportunités dans les exploitations agricoles et dans le système alimentaire au sens large pour réduire les émissions et augmenter la quantité de carbone stockée
- Comprendre que les mesures d'atténuation climatiques les plus appropriées doivent être identifiées au cas par cas et d'une manière spécifique en fonction du site
- Apprécier le potentiel d'amélioration de la gestion individuelle des exploitations agricoles d'une manière holistique afin d'accroître l'efficacité du système et de réduire les émissions
- Comprendre la nécessité d'approches holistiques

1. PRATIQUES AGRICOLES ET ÉMISSIONS DE GES

1.1. Introduction

L'agriculture et l'horticulture se distinguent des autres secteurs industriels par le fait qu'elles sont liées au changement climatique de **trois façons principales** :

- 1) elles émettent des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère, contribuant ainsi au changement climatique ;
- 2) elles peuvent contribuer à la lutte contre le changement climatique parce qu'elles ont le potentiel de retenir le carbone dans les sols et la biomasse ;
- 3) elles sont déjà et seront de plus en plus affectées par le changement climatique, par exemple, par des périodes de sécheresse croissantes ou par des phénomènes météorologiques extrêmes.

Les **activités des systèmes agricoles et alimentaires contribuent au changement climatique** en libérant des GES dans l'atmosphère à tous les stades des chaînes de valeur agricoles, y compris la culture, la production d'intrants (p. ex., les engrais minéraux), le transport, la transformation, l'emballage, le stockage, la vente au détail, la consommation et le traitement des déchets.

On estime que le système alimentaire est responsable de **19 à 29 % des émissions totales de GES** de l'homme (Vermeulen *et al.*, 2012). La majorité de ces émissions sont liées à la production agricole et à l'évolution de l'occupation des sols pour l'agriculture (80 à 86 % au niveau mondial), le reste étant imputable à la **production**

d'intrants agricoles et à d'autres étapes de la chaîne d'approvisionnement (p. ex., transformation, emballage, réfrigération, transport, vente au détail, élimination des déchets) (Vermeulen *et al.*, 2012).

Sans vouloir développer d'avantage, il ne faut pas oublier que la **production animale** est aussi associée à une quantité importante d'émissions mondiales de GES, dont les principales sources sont les émissions des ruminants, le fumier et sa gestion, et la production d'aliments pour animaux.

1.2. Sources d'émissions de GES à la ferme

Les **trois principaux GES** liés à l'agriculture sont le dioxyde de carbone (CO_2), l'oxyde nitreux (N_2O) et le méthane (CH_4). Le méthane est particulièrement important dans les fermes d'élevage et de riziculture, mais ne représente généralement pas une source importante de GES dans les fermes horticoles où le CO_2 et le N_2O sont plus importants.

1.2.1. Émissions provenant des sols

Les sols agricoles sont une source mondiale nette de GES (LaI, 2013). Ils peuvent émettre du carbone à partir de la décomposition de la matière organique du sol et du N_2O et du CO_2 liés à l'application d'azote minéral et organique, d'engrais à base d'urée et de chaux. Les émissions de GES provenant des sols, en particulier les émissions de N_2O , représentent souvent **une source importante des émissions totales de GES de l'horticulture**.

Par exemple, Iriarte et ses collaborateurs (2014) ont constaté que les émissions depuis le sol représentaient 49 % des émissions provenant de la culture de la banane en Équateur (Figure 1). Toutefois, si d'autres sources d'émissions importantes comme l'utilisation de l'énergie pour l'irrigation sont également présentes, l'importance relative des émissions du sol peut être moindre (Figure 3).

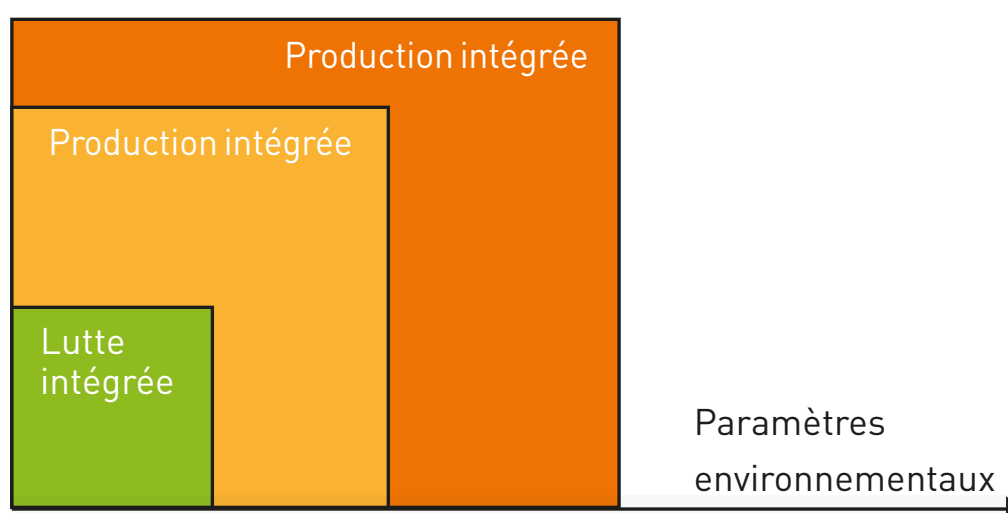


Figure 1 – Contribution en pourcentage des différents processus à l'empreinte carbone des bananes à la ferme. Étude de cas de l'Équateur. Source : adapté de Iriarte *et al.*, 2014.

■ Perte de carbone dans le sol

Les pratiques agricoles peuvent avoir **des effets négatifs sur les sols**, y compris la **perte de matière organique et les émissions de GES connexes**. Les stocks mondiaux de carbone du sol sont menacés : on estime que 25 à 75 % du stock de carbone organique du sol d'origine ont été perdus dans les sols des terres cultivées, des pâturages et des parcours du monde (Lal, 2011 ; Banwart *et al.*, 2015). La perte de carbone des sols cultivés est **affectée par l'utilisation des terres**, les changements d'affectation des terres, la couverture végétale et la gestion des sols, et son ampleur dépend des conditions climatiques, des types de sols, du terrain et de la gestion historique (Lal, 2011). D'une manière générale, **les stocks de carbone du sol sont plus élevés dans les régions du monde plus humides** avec des précipitations plus importantes (Banwart *et al.*, 2015).

L'un des principaux facteurs conduisant à cet appauvrissement du carbone du sol est la conversion des terres occupées par les forêts et les prairies non perturbées en terres agricoles cultivées. Les pratiques de gestion qui contribuent à une perte de carbone dans le sol comprennent l'élimination des résidus, les opérations de travail du sol mécanisées et intensives, les périodes de jachère courtes (ou inexistantes), la réduction ou l'absence de systèmes de rotation des cultures, l'épuisement ou le déséquilibre des nutriments.

Le **travail conventionnel du sol** (labours) consiste à perturber ou à **inverser le profil du sol** à l'aide de charrues, de cultivateurs, de disques, de burins ou d'autres équipements. Les effets du travail conventionnel du sol sur la qualité physique, l'érosion et la dégradation du sol sont souvent négatifs et **augmentent la minéralisation** de la matière organique du sol, et donc les émissions de CO₂ des sols (Sanz *et al.*, 2017). Les effets du travail du sol sur les niveaux de matière organique du sol sont déterminés par la profondeur, l'intensité et la fréquence de la perturbation (Paustian *et al.*, 2000).

Le **drainage des sols organiques** (tourbières) pour faciliter la mise en culture augmente les taux de décomposition du carbone organique et entraîne des émissions importantes de CO₂ et de N₂O (Smith *et al.*, 2014). La quantité de GES émis dépend de processus biophysiques, comme **la décomposition et le compactage** de la tourbe, la disponibilité des éléments nutritifs, la teneur en eau du sol et les niveaux de la nappe phréatique, qui sont tous influencés par les pratiques de gestion (Murdiyarso *et al.*, 2010). Par conséquent, bien que la conversion de terres naturelles et semi-naturelles en terres agricoles (changement d'affectation des terres) et le drainage soient les causes profondes de cette perte de carbone, il est également important d'examiner comment la gestion actuelle influence les émissions après un tel changement.

■ Émissions directes et indirectes de N₂O

L'application de **matières azotées** sur les sols agricoles entraîne des émissions directes et indirectes de N₂O. L'ajout d'engrais minéraux ou organiques, de résidus végétaux, de boues, de fumier, etc., augmente la quantité d'azote disponible dans les sols et entraîne ainsi une augmentation des émissions directes de N₂O par des processus microbiens (c.-à-d. directement des sols sur lesquels l'azote est appliqué). En outre, les apports d'azote entraînent aussi indirectement des émissions de N₂O par volatilisation de l'ammoniac, lessivage et ruissellement de l'azote des sols gérés. Les cultures horticoles peuvent lessiver de grandes quantités d'azote (Goulding, 2000).

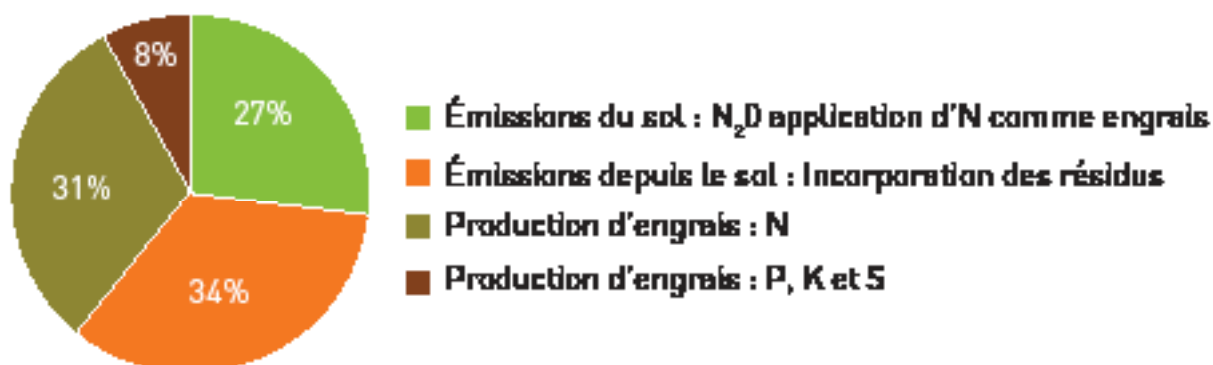
Dans une plantation de thé au Kenya, les émissions de N_2O provenant de l'application d'engrais azotés représentaient 27 % de toutes les émissions de la culture du thé, et les émissions de N_2O provenant des résidus de culture représentaient 34 % supplémentaires (Wiltshire *et al.*, 2009) (Figure 2a). Dans une plantation de café, également au Kenya, les émissions de N_2O liées à la fertilisation azotée minérale ont contribué à 39 % de toutes les émissions pendant la culture (Figure 2b).

La **volatilisation de l'ammoniac** à partir de fumier animal et d'engrais azotés, et surtout d'engrais à base d'urée, contribue également à la formation de particules qui sont un polluant atmosphérique ayant des effets négatifs sur la santé humaine. Elle entraîne également une augmentation locale et régionale des dépôts d'azote qui peut contribuer à l'eutrophisation des cours d'eau et des habitats naturels.

■ Émissions de CO_2 provenant du chaulage et de l'application d'engrais à base d'urée

L'épandage d'engrais contenant de la chaux et de l'urée sur les sols entraîne l'émission de CO_2 à la suite de processus chimiques. Le **chaulage** est utilisé pour réduire les niveaux d'acidité du sol et favoriser une meilleure croissance des plantes dans les systèmes agricoles. Après l'ajout de calcaire ($CaCO_3$) ou de dolomie – $CaMg(CO_3)_2$ –, la chaux carbonatée se dissout et libère du bicarbonate qui se transforme ensuite en CO_2 et en eau. L'application d'**engrais à base d'urée** entraîne la libération de CO_2 qui était auparavant fixé (à partir de sources fossiles) lors de la fabrication industrielle de l'urée.

a) Empreinte carbone du thé



b) Empreinte carbone du café

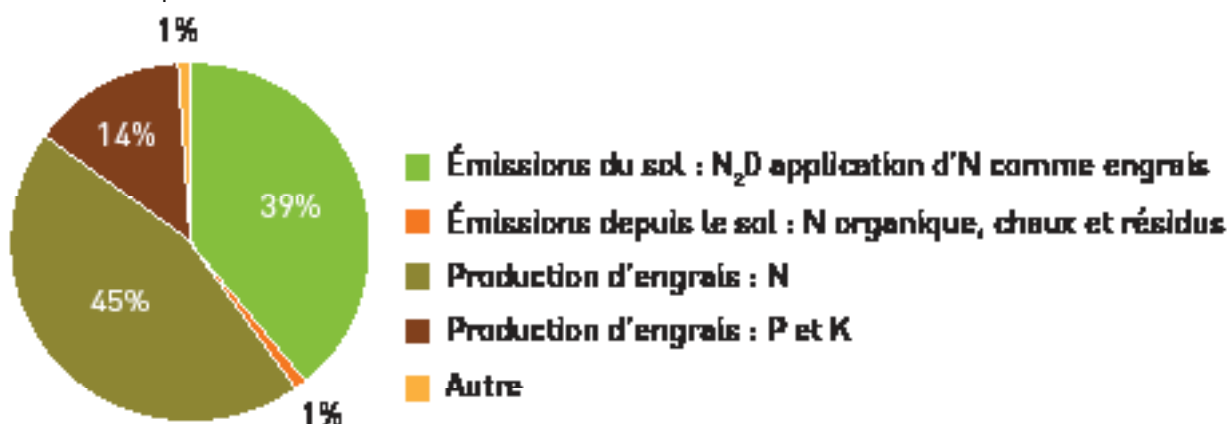


Figure 2 – Contribution en pourcentage des différents processus à l'empreinte carbone à la sortie de l'exploitation : a) du thé et b) du café. **Études de cas au Kenya.** Thé : consommation d'énergie, déchets et production de pesticides non montrés en raison de leur contribution insignifiante. Café : « Autre » comprend l'énergie, les pesticides, les semences et les déchets.

Source : adapté de Wiltshire *et al.*, 2009.

1.2.2. Consommation d'énergie : opérations sur le terrain, irrigation, transformation et stockage à la ferme

Les processus de gestion agricole qui utilisent de **l'énergie fossile**, par exemple, le diesel, l'essence ou l'électricité, émettent des GES et contribuent ainsi au changement climatique. Ces processus de gestion peuvent inclure la préparation des sols pour la plantation, le labourage, l'ensemencement, l'application d'engrais minéraux et organiques, l'application de produits agrochimiques, la récolte et l'irrigation. Si la transformation et/ou le stockage à la ferme des cultures récoltées a lieu, cela représente une autre source d'utilisation d'énergie.

Les polluants atmosphériques non GES liés à la production d'électricité comprennent, par exemple, les émissions de **dioxyde de soufre** (SO₂) (en particulier dans les pays où le mix énergétique national est dominé par le charbon) et **les émissions de NO_x** (IPCC 2006). La production d'énergie contribue également à la **formation d'ozone**, qui est l'un des polluants atmosphériques les plus nocifs pour les plantes et un facteur important du réchauffement planétaire (Royal Society, 2009).

Électricité : la production d'électricité par la combustion de combustibles fossiles comme le pétrole, le charbon ou le gaz naturel génère principalement des émissions de CO₂, mais de petites quantités de CH₄ et de N₂O sont également impliquées. Le mix électrique du pays ou du lieu en question sera important pour les émissions de GES associées : si le mix énergétique national est dominé par le charbon, les émissions de GES par unité d'énergie seront plus élevées que s'il contient plus de gaz naturel. En effet, la combustion du charbon est plus émettrice de carbone que celle du gaz naturel ou du pétrole. Les énergies renouvelables émettent généralement moins de GES par kWh produit que les combustibles fossiles (Moomaw *et al.*, 2011). Certains pays produisent la majeure partie de leur électricité à partir de l'énergie hydraulique, ce qui entraîne de très faibles émissions par kWh.

Carburants : la combustion de carburants comme le diesel et l'essence produit l'émission directe de CO₂, CH₄ et N₂O. Le processus de combustion est généralement optimisé de manière à ce que la quantité maximale d'énergie par unité de combustible soit consommée, produisant la quantité maximale possible de CO₂. Par conséquent, la teneur en carbone des différents combustibles détermine la quantité de CO₂ émise (IPCC 2006). Les émissions de CH₄ et de N₂O, en revanche, **dépendent fortement de la technologie de combustion**. Le Tableau 1 montre les émissions de GES provenant de la production et de la combustion de différents combustibles, telles que présentées dans Bochu *et al.*, (2013). En outre, d'autres polluants atmosphériques qui contribuent à la pollution atmosphérique locale ou régionale sont également émis, notamment le monoxyde de carbone, les composés organiques volatils non méthaniques, le SO₂, les particules et les oxydes de nitrate (NO_x) (IPCC 2006).

Tableau 1 – Émissions de GES en kg éq CO₂ par l, kg ou m³ pour quatre types de combustibles différents. Source : Bochu *et al.*, 2013.

	Émissions de GES provenant de la production et de la combustion
Diesel	2,984 kg CO ₂ e/l
Essence	2,968 kg CO ₂ e/l
Gaz naturel	2,556 kg CO ₂ e/m ³
Houille	2,801 kg CO ₂ e/kg

L'importance des émissions de GES provenant de la consommation de **carburant et d'électricité par** rapport aux autres sources d'émissions dépend de l'intensité énergétique du système de production et des autres procédés utilisés. La **Figure 1** présente une étude de cas sur la culture de la banane en Équateur (Iriarte *et al.*, 2014).

Dans la ferme analysée dans cette étude, la consommation d'énergie comprenait le diesel pour l'irrigation, les carburants pour l'épandage aérien de pesticides et l'utilisation d'électricité pendant la transformation à la ferme ; ces utilisations d'énergie représentaient ensemble 19 % de toutes les émissions du cycle de vie jusqu'à la ferme.

Une autre étude de cas sur la culture de la banane au Costa Rica a estimé que l'utilisation de l'énergie (principalement pour la pulvérisation aérienne) contribuait pour 7 % à toutes les émissions de GES jusqu'à la ferme (Luske, 2010). La consommation de diesel peut également être une source importante d'émissions dans des produits comme les légumineuses à grains et les fruits et légumes (Sonesson *et al.*, 2010).

Il a été démontré que **l'irrigation** contribue à près de 40 % de toutes les utilisations d'énergie jusqu'à la ferme dans les fermes maraîchères en Nouvelle-Zélande (Barber et Pellow, 2005). Basset-Mens *et al.* (2016) ont comparé la consommation d'énergie et les émissions de GES des pommes et des pêches produites en France, et de la clémentine produite au Maroc, et ont souligné l'importance des mix énergétiques nationaux pour déterminer la quantité des émissions de GES liées à l'irrigation.

La consommation d'énergie pour la fertirrigation représente environ 20 % de la consommation totale d'énergie, mais seulement 3 à 5 % des émissions de GES pour les cultures en France. Au Maroc, en revanche, la consommation d'électricité pour la fertirrigation représentait 39 % des émissions totales de GES. Les raisons de cette part beaucoup plus élevée au Maroc sont notamment la part plus importante des combustibles fossiles dans le bouquet énergétique national (France : moins de 10 %, Maroc : 50 %), l'augmentation des besoins en eau de la clémentine et la nécessité de pomper l'eau des puits profonds dans une région pauvre en eau. Les besoins en énergie et en eau des trois cultures sont indiqués au Tableau 2.

La **Figure 3** montre un exemple de culture de pommes de terre au Zimbabwe, où l'irrigation représentait 18 % de toutes les émissions de GES des petites et moyennes exploitations agricoles et 28 % des grandes exploitations commerciales (Svubure *et al.*, 2018).



Source : B. Schiffers

Tableau 2 – Besoins en eau et en énergie pour la culture des pommes et des pêches en France et de la clémentine au Maroc pour les systèmes représentatifs. Source : Basset-Mens *et al.*, 2016.

	Pommes (France)	Pêches (France)	Clémentines (Maroc)
Eau, m3 ha-1	2 767	7 000	8 000
Énergie, MJ ha-1	2 988	7 560	22 830

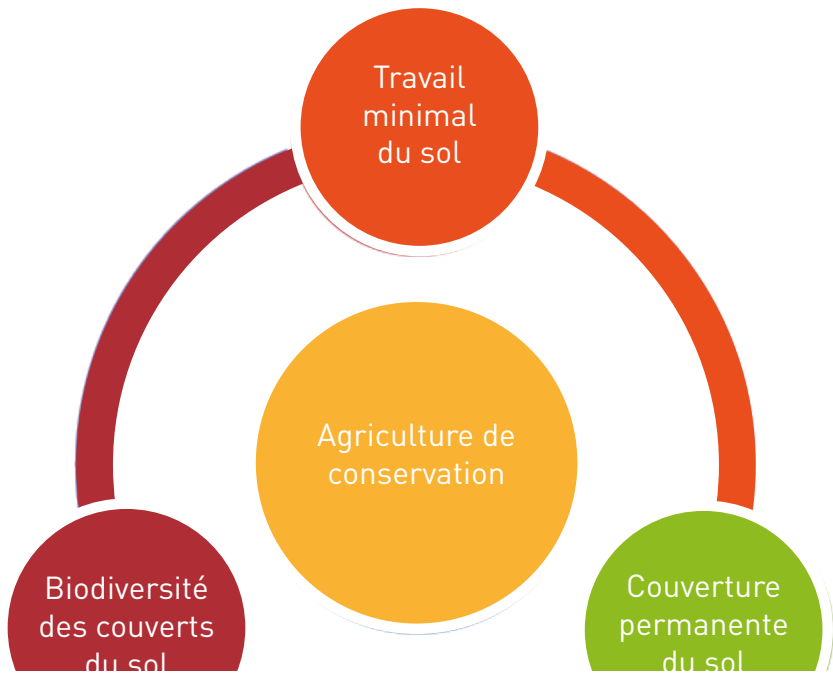


Figure 3 – Émissions de gaz à effet de serre provenant de la culture de la pomme de terre dans les petites et moyennes exploitations agricoles et les grandes exploitations commerciales du Zimbabwe. Source : adapté de Svubure *et al.*, 2018.

Le stockage des produits frais peut augmenter considérablement la consommation d'énergie par rapport aux produits qui n'ont pas besoin d'être stockés.

C'est ce qu'illustre une étude de cas comparant la consommation totale d'énergie des pommes pour quatre scénarios (Milà i Canals *et al.*, 2007) :

- a) pommes produites et consommées dans un même pays de l'Union européenne ;
- b) pommes produites et consommées dans deux pays européens différents ;
- c) pommes produites en Nouvelle-Zélande et consommées en Europe ;
- d) pommes produites dans les autres pays du Sud (Chili, Argentine, Afrique du Sud, Brésil) et consommées en Europe.

Les auteurs ont calculé l'énergie nécessaire pour fournir des pommes aux consommateurs en avril, août, octobre et janvier pour ces quatre scénarios. Les résultats soulignent l'importance du moment de la consommation, qui est lié à la durée du stockage : lorsque les pommes sont en saison en Europe et ont été stockées pendant de courtes périodes, les pommes domestiques ont une consommation énergétique inférieure à celle des pommes importées ; cependant, au printemps et en été européens, la consommation énergétique totale chevauche les quatre scénarios.

L'une des raisons en est la durée de stockage des pommes européennes. Le stockage pendant 5 à 9 mois en Europe a augmenté la consommation d'énergie jusqu'à 16 % par rapport à une situation où il n'y a pas de stockage ni de pertes.

La transformation à la ferme peut comprendre, par exemple, l'emballage, le classement et le lavage, qui peuvent tous consommer de l'énergie fossile.

1.2.3. Brûlage de la biomasse



Source : Sud-Ouest

La **combustion de la biomasse** libère du CO_2 dans l'atmosphère ; cependant, comme ce CO_2 a été récemment fixé par la biomasse brûlée, il n'est généralement **pas considéré comme une source nette** d'émissions de GES. Dans le contexte de la pollution atmosphérique, les émissions de gaz à effet de serre CH_4 et N_2O et d'autres émissions autres que le CO_2 , comme le monoxyde de carbone et les NO_x , sont plus importantes.

Le dioxyde de soufre joue également un rôle dans le changement climatique. Les hydrocarbures, les composés organiques volatils non méthaniques et les émissions d'azote réactif (NO_x) liées à la combustion de la biomasse provoquent **la formation d'ozone** troposphérique (Smith *et al.*, 2008, IPCC 2006). La quantité de GES émis dépend de la quantité de biomasse brûlée et de l'émission de chaque gaz par kg de matière sèche brûlée.

1.2.4. Résidus de cultures et cultures fixatrices d'azote

Lorsque les résidus de culture sont labourés dans le sol ou laissés à la surface du sol, ils restituent au sol l'azote qui a déjà été appliqué dans les engrais organiques ou minéraux. De plus, les résidus de culture souterrains contiennent également de l'azote. Ces apports d'azote en surface et souterrains entraînent l'émission de N_2O

tout comme l'application d'engrais azotés. De même, les cultures fixatrices d'azote représentent **une source d'addition d'azote** au système, et cet azote provoque de nouveau l'émission de N_2O .



Source : Wire.farmradio.fm

Si les résidus sont labourés pendant l'été, l'azote qu'ils contiennent peut être absorbé par la culture suivante après minéralisation ou perdu par lessivage, ce qui peut poser un problème pour les résidus à forte teneur en azote, par exemple, les brassicas (Goulding, 2000). L'azote perdu par lessivage peut causer des émissions de N_2O par **des voies indirectes**.

Dans l'étude de cas sur la culture du thé au Kenya, Wiltshire et ses collaborateurs (2009) ont constaté une contribution significative des résidus de culture (y compris les grades) aux émissions totales de GES (34 %) (Figure 2a).

1.2.5. Déchets organiques et décharge

Svanes et Aronsson (2013) ont analysé l'empreinte carbone de la production de bananes au Costa Rica, en utilisant les données de deux fermes étudiées. Dans ces fermes, les fruits récoltés sont contrôlés et coupés en mains de 5 à 7 doigts avant d'être emballés. Au cours de ce traitement, les déchets sont produits sous forme de tiges, de bananes et de feuilles de bananiers. Ces déchets sont **mis en décharge et génèrent des émissions de CH_4** dues à la dégradation des matières organiques. Dans l'analyse de Svanes et Aronsson (2013), ces émissions de CH_4 ont été la principale cause de l'empreinte carbone à la ferme (environ 30 % de toutes les émissions de GES) (Figure 4).

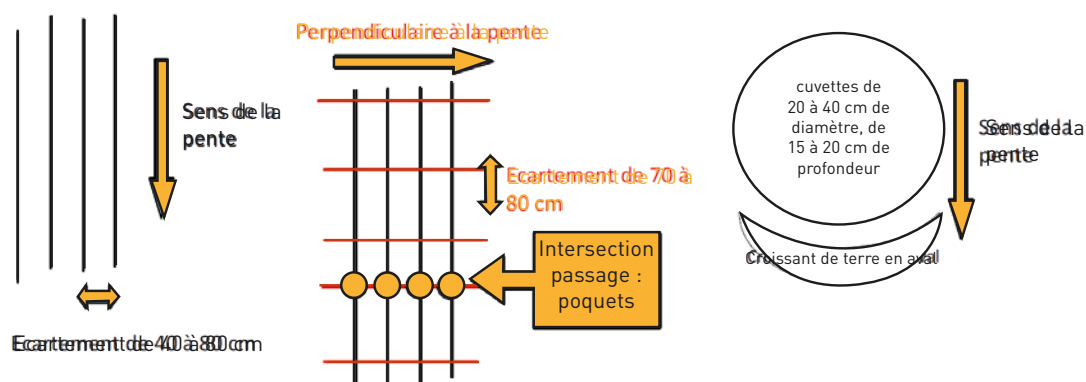


Figure 4 – Contribution en pourcentage des différents processus à l'empreinte carbone des bananes à la ferme. Étude de cas du Costa Rica. Source : adapté de Svanes et Aronsson, 2013.

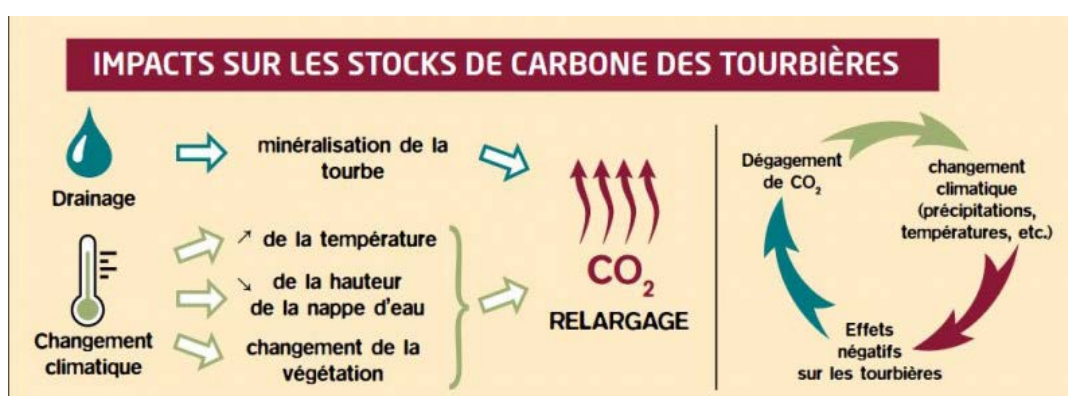
1.2.6. Changement d'affectation des terres

Le changement d'affectation des terres (CAT) est un changement dans l'utilisation ou la gestion des terres par les humains et comprend la conversion de terres naturelles et semi-naturelles en terres agricoles. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) distingue six grandes catégories d'utilisation des terres : les terres forestières, les terres cultivées, les prairies, les établissements humains, les terres humides et les autres terres (p. ex., sols nus, roches, glace).

La conversion d'une catégorie d'utilisation des terres à une autre s'appelle CUT (en anglais LUC, terme généralement utilisé par les auteurs). Les changements apportés aux pratiques de gestion, comme les pratiques de travail du sol dans les systèmes de cultures arables existants, ne s'appellent généralement pas CUT, car ils ne modifient pas la catégorie générale d'utilisation des terres.

La conversion d'une catégorie d'utilisation des terres peut conduire à l'émission de grandes quantités de gaz à effet de serre en raison de **la libération de carbone qui était auparavant stocké dans la biomasse et dans les sols**. Par exemple, les forêts tropicales contiennent beaucoup de carbone, qui est stocké dans leurs sols et dans leurs arbres. Si les arbres sont abattus et que le sol est perturbé par la conversion en terres cultivées ou en prairies, une grande partie de ce carbone stocké est perdue, car le nouveau type d'utilisation des terres a généralement des stocks de carbone inférieurs dans sa biomasse, son sol et ses bassins de matière organique morte (Plassmann, 2017).

La **conversion d'autres habitats**, tels que les savanes, les zones humides ou les zones arbustives tropicales, entraîne également d'importantes émissions de carbone. Les tourbières tropicales, les mangroves et **les sols organiques gorgés d'eau contiennent en général des stocks de carbone très élevés**. Le **drainage de ces habitats** à des fins agricoles augmente les taux de décomposition de ce carbone organique stocké et libère du CO_2 et du N_2O (Smith *et al.*, 2014). Les émissions mondiales de CO_2 provenant des tourbières drainées représentent environ 25 % de toutes les émissions liées au changement d'affectation des terres (Birdsey *et al.*, 2013), où l'Asie du Sud-Est est le point chaud mondial des émissions provenant des sols tourbeux drainés. En Indonésie, ces émissions représentent 60 % du total national. L'un des principaux moteurs de la conversion des sols tourbeux en Indonésie et en Malaisie est l'expansion de la production de palmiers à huile (Dommain *et al.*, 2013). Moins d'informations sont disponibles pour les pays ACP ; cependant, il existe, par exemple, en Ouganda, des tourbières drainées qui sont utilisées pour cultiver des patates douces, des pois et légumineuses, du maïs et des céréales (Dommain *et al.*, 2013).



À l'échelle mondiale, la CUT est une source importante d'émissions de GES : l'utilisation des terres et les changements d'affectation des terres (principalement la déforestation) ont représenté 9 à 11 % des émissions anthropiques mondiales de GES en 2000 à 2010 (Smith *et al.*, 2014).

L'agriculture est le principal moteur direct de la déforestation mondiale et est à l'origine d'environ 70 à 80 % de toute la déforestation (Hosonuma *et al.*, 2012). L'agriculture commerciale et l'agriculture de subsistance sont toutes deux des moteurs puissants de déforestation, mais il existe des différences régionales importantes entre ces deux pressions (Hosonuma *et al.*, 2012).

Les émissions dues au CUT sont **généralement incluses dans les calculs de l'empreinte carbone** liée au produit si le CUT s'est produit dans les fermes analysées **jusqu'à 20 ans avant l'évaluation** (ou une seule période de récolte pour les plantes vivaces, la plus longue des deux périodes étant retenue).

Là où il se produit, le CUT peut représenter une proportion très importante de l'empreinte carbone du produit (ECP) et la dominer (ex. : Plassmann *et al.*, 2010). L'ampleur et la contribution réelle à l'empreinte carbone du produit dépendront du type d'habitat qui a été converti, du type de culture subséquente et de l'intensité des autres processus qui émettent des GES. Par exemple, une étude a montré que le CUT représentait 98 % de l'ECP du cacao du Ghana (Figure 5). Dans les exploitations cacaoyères du Ghana, qui constituent la base de l'analyse de la Figure 5, la plupart des processus à la ferme (récolte, transformation à la ferme) ont été effectués manuellement et aucun engrais minéral n'a été appliqué. Une autre étude de cas sur l'ananas produit au Costa Rica a conclu que les ananas provenant d'exploitations ayant récemment obtenu du CUT en forêt primaire ont un ECP dix fois plus élevé que les ananas provenant d'exploitations n'ayant pas récemment obtenu du CUT (Ingwersen, 2012).

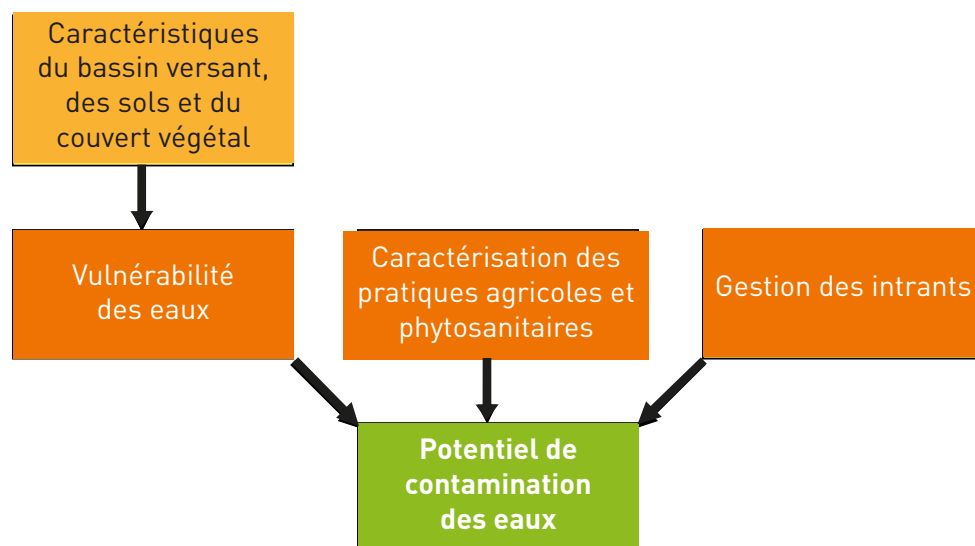


Figure 5 – Émissions de gaz à effet de serre liées à la production agricole de fèves de cacao au Ghana, au transport outre-mer vers le Royaume-Uni et à la transformation en poudre de cacao au Royaume-Uni (en kg de CO₂e/kg de fèves de cacao), y compris le changement d'affectation des terres agricoles au Ghana. Les émissions dues au changement d'affectation des terres ont été modélisées sur la base de statistiques qui montrent que 60 % des terres cacaoyères du Ghana ont été converties en provenance des forêts au cours des 20 dernières années. Source : adapté de Wiltshire *et al.*, 2009.

1.3. Sources d'émissions de GES hors ferme

1.3.1. Production et transport des intrants agricoles

La fabrication d'intrants agricoles, tels que les engrais minéraux, les produits agrochimiques (ex. : pesticides), les emballages en plastique ou les semences, entraîne des émissions de GES dans les usines ou sur les fermes où ils/elles sont produit(e)s. Après la production, les émissions de GES sont également dues au transport de ces intrants depuis leur lieu de fabrication jusqu'aux exploitations agricoles. Ce transport peut consister en différentes étapes utilisant différents modes de transport. Par exemple, les engrais minéraux peuvent être transportés par bateau vers les marchés étrangers, puis par gros camions du port d'importation vers un grossiste dans le pays de destination, et de là vers le consommateur final.

Les émissions provenant de la production et du transport des intrants représentent une source indirecte, en amont, **d'émissions pour les exploitations qui achètent ces matières**. Dans les évaluations de l'empreinte carbone liées aux produits qui tiennent compte du cycle de vie, **ces émissions en amont sont incluses** parce qu'elles sont liées au produit qui est cultivé dans ces fermes. Ils contribuent souvent de façon importante à l'empreinte carbone à la ferme. Par exemple, le Tableau 3 présente les résultats d'une étude de cas sur la production d'ananas à Maurice, où la production d'engrais minéraux représentait 45 % des émissions totales. La production et le transport de paillis de plastique et de produits agrochimiques ont eu une contribution beaucoup plus faible.

Tableau 3 – Pourcentage des émissions de gaz à effet de serre par kg d'ananas frais produit dans une ferme étudiée à Maurice, livré à l'aéroport. Adapté de Plassmann et Edwards-Jones, 2010.

Intrants et processus	Sources d'émissions	Contribution en pourcentage
Production et transport des intrants	Engrais minéraux	45,2 %
	Plastique (pour le paillage)	6,9 %
	Herbicides et régulateurs de croissance	2,4 %
Consommation d'énergie	Diesel	26,2 %
	Électricité	2,8 %
Émissions depuis le sol		16,4 %

La Figure 6 résume les résultats de trois études différentes qui ont analysé l'empreinte carbone des bananes jusqu'au moment où les bananes quittent l'exploitation. La production d'engrais minéraux représentait 23 à 36 % et celle de pesticides entre 0,6 et 9 % dans ces études. Cet écart dans l'importance relative des différentes catégories d'émissions est typique dans les analyses de l'empreinte carbone. Elle est due à une grande variabilité entre fermes (due aux différents environnements, climats, rendements, systèmes de gestion, efficacités, etc.) et aux différences dans les méthodes de calcul appliquées dans les différentes études. Toutefois, dans l'exemple de la Figure 6, les trois études s'accordent à dire que la production d'engrais minéraux et les émissions dans le sol sont les deux principaux points chauds des exploitations bananières.

Les pesticides sont pertinents dans le contexte des impacts de la toxicité pour l'homme et l'environnement, mais la production de produits agrochimiques, comme les herbicides ou les régulateurs de croissance (ou produits utilisés pour le mûrissement des fruits) (comme dans l'exemple du Tableau 3), ne contribue généralement pas de façon importante aux émissions totales de GES. Lorsque de grandes quantités de produits agrochimiques sont appliquées à l'aide de machines, l'impact le plus pertinent pour les émissions de GES **provient de la consommation d'énergie** par celles-ci, comme le montre, par exemple, la production de pommes en France (Basset-Mens *et al.*, 2016).

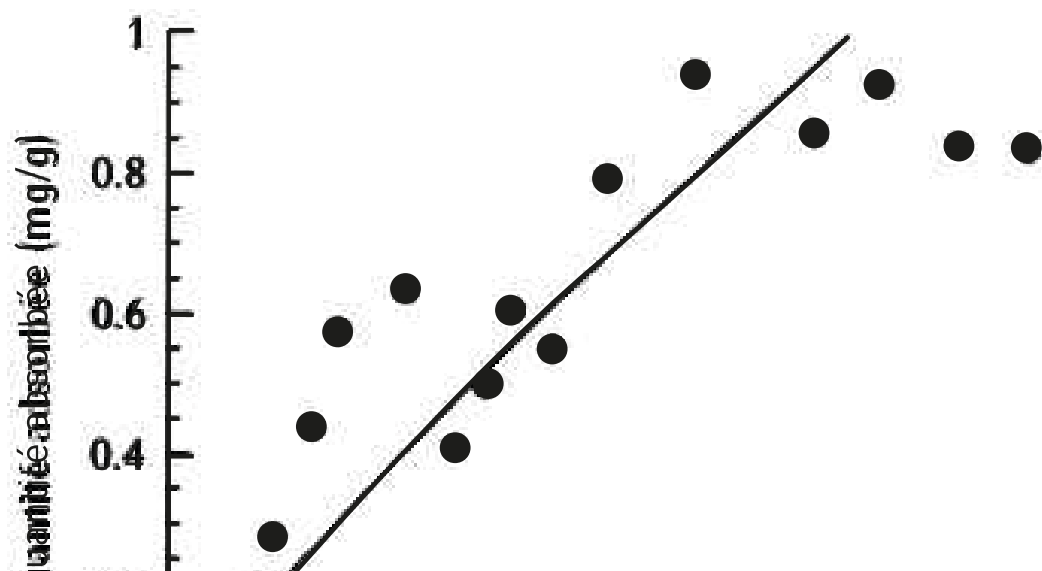


Figure 6 – Contribution en pourcentage des différents processus à l'empreinte carbone totale de la culture de la banane (jusqu'à la ferme) analysée dans trois études de cas dans deux pays (Luske, 2010, Svanes et Aronsson, 2013 : Costa Rica ; Iriarte *et al.*, 2014 : Équateur).

1.3.2. Transport des produits horticoles de la ferme au marché

Le transport des produits récoltés contribue aux émissions de GES dues à l'utilisation de combustibles fossiles et d'énergie. Différents modes de transport sont liés à différentes quantités d'émissions. Dans le Tableau 4, les émissions de GES liées au transport d'une tonne de marchandises sur une distance d'un kilomètre sont indiquées pour plusieurs modes de transport. Le transport par bateau a généralement une charge de GES relativement faible, alors que le fret aérien est le plus élevé. Différentes tailles de camions ou de navires peuvent avoir des efficacités différentes et donc des émissions de gaz à effet de serre.

Tableau 4 – Émissions de GES (en kg éq CO₂) liées au déplacement d'une tonne de marchandises sur 1 km (t*km) pour différents modes de transport. Source : adapté de Edwards-Jones *et al.*, 2008.

Mode de transport	kg CO ₂ e/t*km
Pétrolier transocéanique	0,005
Fret transocéanique	0,011
Train de marchandises	0,038
Camion, 32 t	0,157
Camion, 16 t	0,316
Fourgonnette, < 3,5 t	1,118
Fret par avion	1,142

Des chiffres comme ceux qui figurent au Tableau 4 peuvent être obtenus, par exemple, à partir de publications gouvernementales ou de bases de données commerciales et privées. **Il faut choisir avec soin ces facteurs d'émission** pour une étude particulière parce qu'ils doivent être représentatifs du mode de transport, de son efficacité, de sa technologie et de sa géographie (Plassmann *et al.*, 2010). Les hypothèses sous-jacentes (p. ex., en ce qui concerne le coefficient de charge ou la présomption que les trajets aller-retour sont vides ou non), et l'inclusion ou l'exclusion de la construction et de l'entretien du moyen de transport, des routes et des infrastructures sont également importantes.

L'importance du transport pour l'empreinte carbone des différents produits horticoles dépend dans une large mesure de leur marché de destination, de leur degré de périssabilité et de la possibilité de les transporter par bateau ou par avion sur de longues distances.



Dans l'étude de cas de Wiltshire *et al.*, 2009, le **transport** réfrigéré d'ananas du Ghana vers l'Europe représentait 22 % de toutes les émissions jusqu'au centre de distribution des supermarchés du Royaume-Uni (Figure 7). Pour le café produit au Kenya et vendu sous forme de café instantané au Royaume-Uni, Wiltshire *et al.*, 2009, ont calculé que le transport ne représentait que 4,5 % des émissions totales, la culture 74 % et la transformation 22 %.

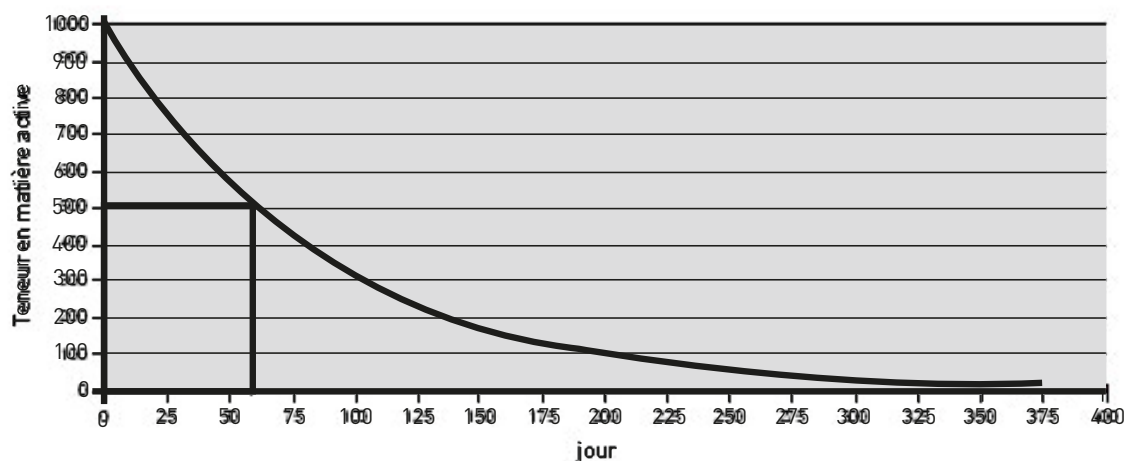


Figure 7 – Émissions de GES (en kg CO_{2e}) pour un ananas frais entier (1,35 kg) produit au Ghana et expédié au Royaume-Uni (jusqu'au centre de distribution des supermarchés britanniques). Source : adapté de Wiltshire *et al.*, 2009.

Le fret aérien est associé à une empreinte carbone beaucoup plus élevée que le transport maritime (Tableau 4), de sorte que les produits transportés par voie aérienne ont généralement une empreinte carbone relativement élevée qui est dominée par cette étape du transport. Par exemple, 57 % de l'impact climatique des roses cultivées en Équateur et transportées par avion aux Pays-Bas est dû au transport aérien (Franze et Ciroth, 2011) ; cependant, malgré cet impact, l'empreinte carbone totale des roses d'Équateur reste inférieure à celle des roses produites aux Pays-Bas (en raison de l'utilisation significative d'énergie dans les serres néerlandaises). Les ananas produits à Maurice (Tableau 3) avaient une faible empreinte carbone à la ferme qui se compare bien à d'autres fruits (0,26 kg de CO₂ e/kg d'ananas) ; cependant, en raison de la courte durée de conservation de cette variété particulière et des exigences logistiques sur une petite île comme Maurice, ils ont dû être acheminés par avion vers leurs marchés en Europe. Ce transport aérien a ajouté 10,8 kg de CO₂ e/kg d'ananas, ce qui éclipse complètement toutes les autres émissions (Plassmann et Edwards-Jones, 2010). Une autre étude de cas sur les haricots d'Espagne produits au Kenya et au Guatemala, et transportés par avion au Royaume-Uni, a révélé que les émissions provenant du transport aérien représentaient 89 % et 91 % des émissions de la chaîne d'approvisionnement, respectivement (Sim *et al.*, 2007).

1.3.3. Réfrigération

La réfrigération est une source de GES en raison de sa consommation d'énergie et, plus important encore, parce que **les appareils de réfrigération utilisent souvent des substances qui sont des GES très puissants**, dont les **hydrochlorofluorocarbures** (HCFC) et les **hydrofluorocarbures** (HFC). Ils sont largement utilisés dans la réfrigération, y compris l'entreposage frigorifique, la transformation des aliments, le transport et la réfrigération industrielle.



Le **Protocole de Montréal de l'ONU**⁴⁰ est un accord environnemental multilatéral qui régleme la production et l'utilisation de ces substances.

Les HCFC contribuent à l'appauvrissement de la couche d'ozone et au changement climatique, et ils seront complètement éliminés d'ici 2020 dans les pays développés et d'ici 2030 dans les pays en développement.

Les HFC n'ont pas d'impact négatif sur la couche d'ozone, mais bien sur le changement climatique. Leur impact sur le changement climatique est entre 12 et 14 000 fois supérieur à celui du CO₂. Les parties au Protocole de Montréal ont convenu de prendre des mesures pour réduire les HFC au cours des deux prochaines décennies.

Parce que la réfrigération implique généralement l'utilisation de ces substances ayant un impact très élevé sur le changement climatique, elle peut contribuer de manière significative à l'empreinte carbone des produits qui sont stockés au froid ou réfrigérés pendant leur transport vers les détaillants ou les consommateurs. Un exemple de cette dernière est illustré à la Figure 7, qui est basée sur une étude de cas sur les ananas produits au Ghana (Wiltshire *et al.*, 2009). Les ananas récoltés sont refroidis à 7 °C lors de leur transport vers le port d'exportation et de leur expédition par conteneurs vers l'Europe. Les transports (consommation d'énergie) et la réfrigération ont été les principaux contributeurs à l'empreinte carbone par ananas jusqu'au centre de distribution des supermarchés du Royaume-Uni et représentaient respectivement 22 % et 50 % de toutes les émissions.

1.3.4. Autres sources d'émissions

L'emballage de produits frais est une autre source potentielle d'émissions de GES.

Par exemple, l'emballage des bananes au Costa Rica et en Équateur représentait entre 8 % et 19 % de toutes les émissions jusqu'au port de destination ou de vente au détail dans le pays de consommation en Europe (Luske, 2010, Iriarte *et al.*, 2014).

Les déplacements des consommateurs en voiture pour se rendre au supermarché peuvent également contribuer de manière significative à l'empreinte carbone du cycle de vie.

40

www.unenvironment.org/ozonaction/who-we-are/about-montreal-protocol.

Pour les produits cuits, la **façon dont les consommateurs préparent leurs aliments et l'efficacité énergétique de l'équipement de cuisson** sont importantes.

Enfin, la **quantité de nourriture perdue ou gaspillée** de la ferme au domicile des consommateurs a également un impact sur les émissions de GES.



Chaque aliment perdu ou gaspillé est associé à des émissions provenant de sa culture, de son transport, de son stockage, de son emballage ou d'autres étapes de la chaîne d'approvisionnement. À l'échelle mondiale, les **pertes et les déchets alimentaires** sont une source énorme d'émissions.

On estime qu'environ un tiers de tous les aliments produits pour la consommation humaine sont perdus ou gaspillés par unité de poids, et que ces aliments perdus et gaspillés représentent environ 8 % de toutes les émissions mondiales de GES. **Les fruits et légumes représentent la plus grande part des déchets sur la base de leur poids.** Dans les pays industrialisés, les déchets se produisent principalement pendant la vente au détail et la consommation, dans les pays à faible revenu pendant la production et le stockage. À titre d'exemple, une étude de cas réalisée en Ouganda a montré que près de 15 % de toutes les bananes à cuire produites dans le pays subissent une détérioration après récolte, 7,2 % se détériorant complètement et le reste partiellement (Kikulwe *et al.*, 2018).

2. POSSIBILITÉS D'ATTÉNUATION ET DE COMPENSATION DES ÉMISSIONS DE GES

2.1. Atténuation ou compensation des émissions ?

L'atténuation du changement climatique signifie réduire ou prévenir les émissions de GES d'une part, et améliorer l'élimination du carbone de l'atmosphère d'autre part (p. ex., en plantant des forêts).

Tous les secteurs industriels peuvent et doivent contribuer aux efforts d'atténuation du changement climatique, y compris l'agriculture et l'ensemble du système alimentaire. L'atténuation du changement climatique comprend des activités telles que :

- l'augmentation de l'utilisation des énergies renouvelables ;
- l'augmentation de l'efficacité énergétique ;
- le changement de notre comportement et de notre demande de produits à forte intensité d'émissions de GES ;
- l'introduction de nouvelles technologies comme les voitures électriques.

D'une manière générale, il existe **trois grandes possibilités** d'atténuer le changement climatique en agriculture et en horticulture (Smith *et al.*, 2008) :

- 1) réduire les émissions (p. ex., en utilisant plus efficacement les engrais azotés) ;
- 2) l'amélioration des prélèvements (p. ex., en retenant le carbone dans les sols ou la biomasse des arbres des systèmes agroforestiers) ;
- 3) éviter ou remplacer les émissions (p. ex., éviter les émissions de combustibles fossiles en utilisant la bioénergie).

Les entreprises peuvent mettre en œuvre des mesures d'atténuation du changement climatique qui mènent à des réductions ou à des absorptions d'émissions au sein de leurs propres opérations ou chaînes d'approvisionnement. Par contre, les compensations de carbone représentent des réductions d'émissions de GES ailleurs. Ils financent des projets et des activités externes qui, par exemple, protègent ou restaurent les forêts, réduisent les émissions dues aux activités industrielles ou augmentent l'approvisionnement en énergie renouvelable.

La quantité de GES économisée grâce à ces projets est **contrôlée par des organismes indépendants** qui vendent des certificats de réduction de CO₂. Ces organisations définissent également des exigences clés pour des projets de compensation crédibles et des méthodologies que les développeurs de projets doivent suivre pour générer des certificats de réduction de CO₂ vendables, lorsque la vente des certificats finance le projet.

L'une des principales exigences pour des projets crédibles de compensation carbone est qu'ils n'auraient pas été mis en œuvre sans ce financement, c'est-à-dire qu'il faut démontrer que les réductions d'émissions générées par le projet s'ajoutent aux mesures qui auraient été appliquées en l'absence du projet. Par exemple, si une politique gouvernementale exige la mise en œuvre de certaines mesures d'atténuation du changement climatique, les entreprises devraient les mettre en œuvre de toute façon. Cela signifierait que le projet ne peut pas être utilisé pour générer des certificats de réduction de CO₂ (ou « compensations de carbone ») **parce que la réduction des**

émissions aurait eu lieu sans le financement supplémentaire. Cette exigence d'« additionnalité » garantit que seuls les projets qui conduisent réellement à une réduction des émissions de GES généreront des compensations carbone.

Il existe **deux types de marchés** du carbone.

- 1) Sur le **marché réglementaire du carbone**, les compensations sont vendues aux organisations et aux gouvernements qui doivent se conformer aux objectifs de réduction des émissions de GES fixés par le Protocole de Kyoto ou d'autres initiatives réglementaires (p. ex., le système communautaire d'échange de quotas d'émission). Par exemple, le mécanisme de développement propre permet aux pays industrialisés d'acheter des crédits de réduction d'émissions certifiés pour atteindre leurs objectifs nationaux de réduction des émissions de GES dans le cadre du Protocole de Kyoto. Ces crédits peuvent être obtenus grâce à des projets de réduction des émissions dans les pays en développement selon des règles strictes.
- 2) Le **marché volontaire des crédits et des compensations de carbone** implique différentes organisations et différents fournisseurs de compensations de carbone, par exemple, le *Voluntary Carbon Standard* ou le *Gold Standard* développé sous la direction du *World Wildlife Fund* (WWF). Ces normes peuvent tenir compte des émissions de GES seules ou en même temps que d'autres avantages environnementaux, sociaux et économiques. Les normes volontaires définissent les critères que les projets doivent respecter, puis émettent des compensations de carbone équivalentes à la réduction des émissions de GES d'un projet.

La compensation carbone a été critiquée pour plusieurs raisons. L'une des raisons est que les entreprises, les organisations et les particuliers devraient plutôt réduire les émissions résultant de leurs propres activités que de payer pour des réductions ailleurs. D'autres raisons incluent des doutes sur le fait que les projets soient réellement « additionnels » et représentent des avantages réels en matière d'atténuation du climat : **une focalisation unique sur les émissions de GES tout en ignorant les autres impacts environnementaux ; des impacts négatifs possibles sur les communautés locales** ; un manque potentiel de supervision indépendante ; le potentiel de fuite de carbone (où les économies d'émissions dans un endroit entraînent une augmentation des émissions ailleurs) et les questions concernant la permanence des réductions de carbone dans les forêts. Pour une discussion sur l'« éthique de la compensation carbone », voir Hyams et Fawcett, 2013.



La Coopedota⁴¹ (Birkenberg et Birner, 2018), une coopérative caféière du Costa Rica, est un exemple d'entreprise qui a combiné à la fois la réduction des émissions de GES et les compensations pour obtenir une certification carbone neutre. La coopérative a utilisé **la norme indépendante PAS 2060** (*Publically Available Specification*) *Specification pour la démonstration de la neutralité carbone* **qui définit les exigences pour atteindre et démontrer la neutralité carbone**. Ce processus implique la quantification de toutes les émissions de GES, la mise en œuvre de stratégies de réduction et, enfin, la compensation des émissions restantes par des compensations carbone.

2.2. Atténuation dans les exploitations agricoles

Comme l'ont montré les sections précédentes qui décrivent les différentes sources d'émissions de GES à la ferme, l'importance relative de ces sources peut varier dans une certaine mesure entre les systèmes de production, les pays, les chaînes d'approvisionnement et les fermes individuelles. Par exemple, si l'irrigation nécessite de grandes quantités d'énergie, cela peut représenter une part importante des émissions totales de GES ; en revanche, si aucune irrigation n'a lieu, d'autres processus agricoles peuvent devenir plus importants, par exemple, la production d'engrais minéraux ou les émissions des sols fertilisés. Par conséquent, les meilleures possibilités de réduction des émissions doivent être évaluées au cas par cas.

2.2.1. Utilisation équilibrée et efficace des engrais minéraux

La production et l'application d'engrais minéraux dominent souvent les émissions de GES jusqu'à la ferme. Il est donc important d'utiliser ces engrais efficacement et de réduire les sur-applications, par exemple, en optimisant le moment de l'application, en choisissant le type d'engrais le plus approprié, en appliquant des doses appropriées, en tenant compte de la variabilité spatiale à l'intérieur des champs et entre les champs et en considérant une fertilisation de précision (Smith *et al.*, 2014).

En outre, il est également important de tenir compte de l'équilibre correct des différents éléments nutritifs, car cela augmentera leur efficacité d'utilisation et aura un impact positif sur les rendements. Par exemple, Müller Carneiro et ses collaborateurs (2019) ont mené une étude de cas sur la production de mangues au Brésil : ils ont constaté que le phosphore était sous-appliqué et le potassium sur-appliqué (comparativement à la recommandation locale). Un tel déséquilibre dans les nutriments des plantes peut entraîner une diminution des rendements en raison d'une brûlure foliaire due à une trop grande quantité de potassium et à une faible croissance des racines et une diminution de la floraison due à une sous-application du phosphore.

Une autre option consiste à planter des cultivars plus efficaces en azote, par exemple, en passant de la clémentine à la mandarine (Basset-Mens *et al.*, 2016), et à sélectionner de nouveaux cultivars qui ont le potentiel de réduire les émissions de GES. Svanes et Aronsson (2013) ont estimé que le passage aux engrais à libération contrôlée dans la culture de la banane au Costa Rica pourrait réduire les émissions de N₂O et l'empreinte carbone jusqu'à la ferme de 9 %.

41 www.bsigroup.com/en-GB/PAS-2060-Carbon-Neutrality/.

2.2.2. Consommation d'énergie et efficacité énergétique

Les émissions de GES liées à l'irrigation **peuvent être réduites en rendant le système d'irrigation plus efficace** et en adaptant étroitement les événements d'irrigation aux besoins des plantes afin d'obtenir le meilleur rendement avec un volume d'eau minimal (Müller Carneiro *et al.*, 2019). Cela réduira la quantité totale d'eau nécessaire ainsi que les besoins énergétiques, ce qui est particulièrement important dans les régions où l'eau est rare.

La **source de l'énergie utilisée** pour l'irrigation joue également un rôle important, comme l'illustrent Basset-Mens *et al.* (2016). Dans la production de clémentine marocaine, l'irrigation contribue de manière significative à l'empreinte carbone, car l'eau d'irrigation doit être pompée à partir de puits profonds, et les pompes électriques sont associées à des émissions de GES élevées en raison de la part importante des combustibles fossiles dans le mix énergétique national. Le Gouvernement marocain s'attaque au double problème de la rareté de l'eau et des émissions élevées de GES en recherchant des pratiques alternatives qui consomment moins d'eau, en améliorant l'accès à l'eau ou en déplaçant la production vers des régions où l'eau est plus accessible.

Parmi les autres options possibles figurent la **construction de nouveaux barrages**, le **stockage des eaux de pluie** ou de nouvelles centrales électriques basées sur les énergies renouvelables (Basset-Mens *et al.*, 2016).

Parmi les autres mesures visant à accroître l'efficacité de l'irrigation figurent⁴² :

- le choix de la méthode d'irrigation la plus appropriée pour le sol, la culture et la région ; la réduction de la pression de l'eau lorsque cela est possible ;
- l'augmentation de l'efficacité des pompes et des moteurs ;
- l'utilisation de systèmes de micro-irrigation qui appliquent l'eau près des bases des plantes individuelles ;
- l'application d'eau à intervalles appropriés selon le type de sol ;
- l'irrigation pendant la nuit pour réduire la consommation globale d'eau par évaporation, qui élimine la perte diurne de temps.

La consommation de diesel pour les opérations sur le terrain peut être réduite par la mise en œuvre de plusieurs mesures. Par exemple, des solutions innovantes contre les ravageurs et les maladies peuvent réduire la quantité de produits agrochimiques appliqués, ce qui entraîne également une réduction de la consommation de diesel. Dans les vergers de pommiers français, de nouvelles solutions sont à l'étude, notamment le recouvrement des vergers avec des bâches en plastique polyéthylène qui réduisent les infestations de tavelure ou avec des filets anti-insectes qui réduisent les infestations par le carpocapse (Basset-Mens *et al.*, 2016).

D'autres options comprennent (O'Halloran *et al.*, 2008) : sensibilisation et formation aux techniques de conduite éco-énergétiques ; entretien des moteurs et des machines ; équilibrage optimal des charges et réglage des pneus ; adaptation des machines et des dimensions des moteurs aux tâches ; conduite à la vitesse et aux vitesses les plus économiques en carburant, comme recommandé par les fabricants ; et planification

optimale des opérations sur le terrain. Pour les entrepôts frigorifiques, des mesures d'efficacité énergétique et des énergies renouvelables pourraient être envisagées. Certains types de bioénergie et l'utilisation de l'énergie solaire ou éolienne peuvent également contribuer à réduire les émissions.

2.2.3. Augmentation de la teneur en carbone du sol

La **capacité des sols à stocker** (ou « séquestrer ») du carbone supplémentaire dépend de l'équilibre entre la photosynthèse qui fixe le CO₂ de l'air, la respiration des organismes décomposeurs qui libèrent du CO₂ dans l'air et la stabilisation du carbone du sol. Pour l'atténuation des changements climatiques, l'augmentation de la teneur en carbone organique du sol est considérée comme une option peu coûteuse avec une faible empreinte écologique et hydrique, et une faible consommation d'énergie, c'est-à-dire une option sans regret avec peu d'effets externes négatifs. Le maintien des stocks actuels de carbone organique du sol devrait être l'objectif minimal, en particulier dans les sols riches en carbone comme les tourbières (FAO, 2017).

Bien que les sols puissent contribuer à l'atténuation du changement climatique en absorbant le carbone atmosphérique, **il est important de considérer qu'ils ont une capacité limitée dans le temps de le faire jusqu'à ce qu'ils aient atteint un nouvel équilibre** et que les gains éventuels sont facilement réversibles si les pratiques de gestion qui favorisent la séquestration du carbone sont abandonnées (Paustian *et al.*, 2000).

Les mesures qui peuvent maintenir et augmenter la teneur en carbone du sol comprennent :

- la réduction de l'érosion physique par le vent ou l'eau ;
- la réduction de la perturbation mécanique des sols ;
- le maintien de la couverture végétale ;
- l'augmentation de la teneur en eau des sols organiques ;
- l'augmentation de la répartition du carbone sous terre (c'est-à-dire une densité de racines supérieure) (Banwart *et al.*, 2015).

L'augmentation de l'approvisionnement en matière organique peut être obtenue en retournant les résidus, en augmentant la production de biomasse, en appliquant des composts, des cultures de couverture, des cultures pérennes et en augmentant les rendements et les apports de résidus par une fertilisation accrue dans les systèmes à faible rendement.

D'autres options comprennent **des rotations de cultures complexes**, la gestion intégrée des éléments nutritifs, l'application du biochar et la prévention de l'extraction des éléments nutritifs du sol et du compactage du sol (Lal, 2013 ; FAO, 2017).

L'**agroforesterie** et d'autres systèmes diversifiés, y compris l'intégration des cultures et de l'élevage, sont particulièrement importants dans ce contexte (FAO, 2017).

Les réactions à ces mesures varient selon le climat et le type de sol. Par conséquent, les pratiques les plus appropriées doivent être choisies en fonction des conditions locales (FAO, 2017). Parmi les autres avantages découlant de l'augmentation de la matière organique du sol, mentionnons l'amélioration de la qualité du sol et de l'eau,

la réduction de l'érosion, une meilleure fertilité du sol et une meilleure production agricole (Paustian *et al.*, 2000).

Le travail minimal du sol, le travail réduit du sol et les systèmes sans labour augmentent souvent la teneur en carbone du sol, parce qu'ils réduisent ou évitent la perturbation du sol qui entraîne une décomposition et une érosion accrues. Cependant, **cette augmentation du carbone du sol n'est pas toujours évidente dans les systèmes de travail réduit du sol** (Smith *et al.*, 2008), et certaines études ont constaté un changement dans la distribution du carbone du sol à travers les horizons du sol, mais aucune augmentation nette du contenu total en carbone du sol (Sanz *et al.*, 2017).

De plus, il y a un risque d'augmentation des émissions de N_2O dans les systèmes sans (ou avec peu de) labours, en particulier dans les sols à drainage restreint et dans les climats humides (Rochette, 2008). D'autres recherches sont nécessaires pour **mieux comprendre les effets de la réduction du travail du sol** sur les niveaux de carbone du sol et les émissions nettes de GES, et comment les facteurs climatiques et les conditions du sol les influencent (Smith *et al.*, 2008). Il est important de tenir compte des conditions locales, où l'agriculture sans labour et l'agriculture de conservation conviennent le mieux aux sols bien drainés et aux terrains qui sont sujets au ruissellement et à l'érosion, à la formation de croûtes et au compactage (Lal, 2011).

En revanche, **la culture sans labour ne convient pas aux sites où les résidus de culture sont enlevés**, où **les sols sont argileux** et **souvent anaérobies**, où les températures printanières ne sont pas optimales et où les mauvaises herbes vivaces constituent un grave problème (Lal, 2011). Contrairement aux avantages incertains de la réduction du travail du sol liés aux émissions de CO_2 et de N_2O , la réduction de l'utilisation de machines agricoles et donc de l'énergie fossile est un avantage climatique évident.

L'utilisation de **cultures de couverture, d'engrais verts et de pailis** peut accroître les stocks de carbone organique du sol, seul ou en combinaison avec un travail réduit du sol. Les cultures de couverture favorisent la rétention du sol et des éléments nutritifs entre les cycles de culture. Si les résidus de culture sont retenus, ils ont tendance à augmenter le carbone du sol, parce qu'ils sont les précurseurs de la matière organique du sol (Smith *et al.*, 2008). Si l'on peut éliminer le brûlage des résidus de culture, non seulement cela augmentera le retour de la matière organique dans le sol, mais cela réduira également les émissions de GES et d'autres polluants provenant du feu (Smith *et al.*, 2008).

2.2.4. Gestion des sols organiques

En l'absence d'oxygène dans des conditions d'inondation, les sols organiques accumulent de grandes quantités de carbone, parce que la décomposition des matières organiques est supprimée. Le drainage à usage agricole conduit à l'aération de ces sols, ce qui augmente les taux de décomposition et libère du CO_2 et du N_2O . Ces émissions peuvent être réduites au moins dans une certaine mesure en évitant les cultures en ligne et le labourage en profondeur, et en maintenant une nappe phréatique moins profonde. Dans la mesure du possible, les nappes phréatiques devraient être de nouveau relevées et tout drainage supplémentaire de ces sols devrait être évité (Smith *et al.*, 2008).

2.2.5. Augmentation des stocks de carbone dans les exploitations agricoles

Les plantes absorbent le carbone au fur et à mesure de leur croissance, de sorte que le carbone atmosphérique peut également être enfermé dans la nouvelle biomasse des fermes, par exemple, dans **les systèmes agroforestiers, les arbres d'ombrage, les haies, les bandes enherbées ou les cultures horticoles vivaces, comme les arbres fruitiers ou les arbres à épices.**

Par exemple, il a été démontré que les plantations de cocotiers absorbent de 15 à 35 mg de CO₂ par hectare et par an selon le cultivar, le type de sol, la zone climatique et la gestion (Kumar, 2013). Cependant, pour l'atténuation des changements climatiques, il est important que cette biomasse soit maintenue sur de longues périodes et rotations. Parmi les avantages supplémentaires possibles, mentionnons la réduction de l'érosion éolienne avec des effets positifs sur les niveaux de carbone du sol, l'augmentation des rendements et une plus grande résilience aux changements climatiques (Smith *et al.*, 2014).

2.2.6. Amélioration de la gestion de l'exploitation agricole

De nombreuses études de cas ont mis en évidence de grandes différences dans les impacts environnementaux des exploitations agricoles d'un même pays ou d'une même région (p. ex., Mouron *et al.*, 2006). Cela met en lumière **les effets des facteurs de gestion individuels sur l'ampleur des émissions de GES** et d'autres impacts environnementaux, et implique que le potentiel d'amélioration de la performance environnementale des fermes individuelles est important.

Par exemple, Milà i Canals et ses collaborateurs (2006) ont constaté une différence de consommation d'énergie de 30 fois la consommation d'énergie pour les mêmes opérations dans les vergers de pommiers en Nouvelle-Zélande (ex. : fauchage, éclaircissage, taille, récolte) effectuées par différents producteurs. Une importante opportunité d'atténuation réside donc dans la formation, la sensibilisation et une meilleure compréhension de l'influence des décisions de gestion sur les impacts environnementaux.

2.3. Atténuation en aval et en amont

En vertu du Protocole de Montréal de l'ONU, les substances utilisées dans la **réfrigération** qui ont un fort impact sur le changement climatique sont progressivement éliminées. Des solutions de remplacement, comme l'ammoniac ou les hydrocarbures, sont introduites pour réduire les impacts et améliorer l'efficacité énergétique. **Il est important que les réfrigérants soient correctement gérés** et que tout l'équipement soit manipulé, entretenu et éliminé de façon appropriée par un personnel qualifié.

Une autre option pour réduire l'impact du transport longue distance sur l'empreinte carbone des produits frais est l'optimisation de la **logistique du transport**. Dans leur étude de cas sur les bananes produites en Équateur et expédiées en Europe, Iriarte *et al.* (2014) ont analysé deux scénarios pour le transport outre-mer. Le scénario le plus pessimiste était basé sur de petits navires frigorifiques qui sont moins efficaces que les grands porte-conteneurs et retournent généralement vides à leur point d'origine. Dans le meilleur des cas, on a supposé que le transport se ferait à bord de porte-conteneurs et que les navires transporteraient d'autres produits au retour, de sorte

que les émissions de GES du voyage de retour ne soient pas prises en compte dans l’empreinte carbone des bananes. Le Tableau 5 montre qu’une **logistique de transport améliorée** peut réduire l’empreinte carbone de 56 %. De même, Svanes et Aronsson (2013) ont constaté que l’empreinte carbone des bananes produites au Costa Rica et consommées en Europe serait inférieure de 45 % si elles étaient transportées dans des navires plus grands et plus efficaces qui ne revenaient pas vides.

Parmi les autres mesures qui conduisent à une réduction des émissions dues aux **transports** figurent la planification optimale des itinéraires, l’augmentation de la charge moyenne par trajet, le choix de modes de transport à faible émission de carbone, un entretien adéquat, l’utilisation de carburants émettant moins de CO₂ (p. ex., biocarburants ou hydrogène), la formation des conducteurs pour accroître le rendement énergétique, le covoiturage et le transport en retour (Garnett, 2011 ; PCF Project, 2009a).

En raison des émissions importantes liées au **fret aérien**, **le passage du transport aérien au transport maritime, dans la mesure du possible, est une option permettant de réduire considérablement les émissions de GES dues au transport longue distance.**

Par exemple, Stoessel et ses collaborateurs (2012) ont présenté une étude de cas sur les asperges blanches cultivées au Mexique et au Pérou, et consommées en Suisse. Afin de répondre aux préoccupations liées aux changements climatiques, la quantité de produits expédiés au lieu d’être transportés par avion a été considérablement augmentée, ce qui a été rendu possible grâce à l’amélioration de la logistique et des techniques de stockage.

Tableau 5 – Contribution des différentes étapes de la chaîne d’approvisionnement à l’empreinte carbone globale des bananes cultivées sur une ferme en Équateur et transportées en Europe pour deux scénarios de transport outre-mer. Les chiffres sont les moyennes de 2009-2011. Source : Iriarte *et al.*, 2014.

	Scénario le plus pessimiste	Meilleur des cas
Raffinement	0,24	0,24
Manipulation des fruits après la récolte	0,002	0,002
Emballage	0,087	0,087
Transport national	0,008	0,008
Transport outre-mer	0,71	0,12
Total	1,05	0,46

La **réfrigération** est également une source importante d’émissions liées à la **vente au détail et à la production**. Les possibilités de réduction comprennent l’amélioration de l’efficacité énergétique, la spécification correcte et l’utilisation appropriée de l’équipement, le développement de nouvelles technologies, la prévention des fuites de réfrigérants et les solutions de rechange aux réfrigérants ayant un impact climatique important (Garnett, 2011).

La gestion et l’efficacité énergétiques sont également importantes **pour les magasins, les bâtiments, les bureaux**, etc., et l’utilisation de sources d’énergie renouvelables peut également contribuer à réduire les émissions globales de GES provenant du commerce

de détail et de la fabrication. Les émissions liées à l'**emballage** peuvent être réduites en développant des emballages plus légers et en important en vrac (Garnett, 2011).

Enfin, le **consommateur** final contribue souvent pour une grande part aux émissions totales de GES du cycle de vie des produits alimentaires (p. ex., Milà i Canals *et al.*, 2008 ; PCF Project, 2009b). Sensibiliser les consommateurs aux émissions de GES liées à leurs courses, aux méthodes de cuisson, à l'efficacité énergétique et aux déchets alimentaires peut contribuer à réduire ces émissions.

Réduire efficacement les **pertes et les déchets alimentaires** nécessitera une approche intégrée de la chaîne d'approvisionnement, car de nombreuses options possibles n'auront l'effet souhaité que si d'autres parties de la chaîne d'approvisionnement sont également améliorées.

Par exemple, l'amélioration de l'entreposage frigorifique pour réduire les pertes après récolte ne peut être efficace que si les agriculteurs ont accès aux marchés et aux infrastructures de transport.

Diverses mesures sont à l'étude pour réduire les pertes. Nombre d'entre elles s'appliquent aux étapes postérieures à la récolte, sont technologiques (p. ex., l'amélioration de l'entreposage frigorifique), impliquent de nouvelles politiques ou visent à modifier les comportements de consommation. En ce qui concerne les produits facilement périssables, comme de nombreuses cultures horticoles, les options comprennent : l'établissement et l'entretien d'infrastructures pour réduire leur détérioration ; l'amélioration du stockage, du traitement et du transport ; ou des programmes nationaux pour améliorer les chaînes du froid (Lipinski *et al.*, 2013 ; HLPE, 2014).

3. NÉCESSITÉ D'ÉVALUATIONS HOLISTIQUES ET D'UNE APPROCHE SYSTÉMIQUE

Étant donné que la production agricole comprend différentes sources d'émissions et différents GES, il **est important de tenir compte de toutes les pratiques et des effets nets de toute mesure d'atténuation sur tous les GES** afin d'éviter un transfert involontaire du fardeau d'un processus ou d'un GES à un autre.

Par exemple, les systèmes sans labour peuvent avoir un impact positif en augmentant les niveaux de carbone organique du sol ; cependant, les émissions de N₂O peuvent augmenter en même temps ; il est donc important de tenir compte du bilan net de ces GES lors de l'évaluation des avantages globaux de l'atténuation climatique. De même, si une variété plus efficace du point de vue de l'azote produisait moins de GES pendant sa culture, mais que sa durée de conservation était plus courte, ce qui entraînait plus de gaspillage, la nécessité de refroidir ou d'emballer davantage, cela pourrait entraîner une augmentation des émissions à d'autres étapes de la chaîne d'approvisionnement.

Au niveau de l'exploitation agricole, l'approche systémique dite « **agriculture de conservation** » combine plusieurs pratiques mentionnées précédemment en favorisant la rétention des résidus de culture comme paillis de surface, y compris les cultures de couverture dans la rotation, et en mettant en œuvre une perturbation minimale du sol. Ces pratiques peuvent améliorer la fertilité des sols, réduire les risques d'érosion, conserver l'humidité des sols et contribuer à l'atténuation des changements climatiques en **augmentant les niveaux de carbone dans le sol** (bien que cette dernière soit associée à une certaine incertitude) (Sanz *et al.*, 2017).

Les **pratiques agro-écologiques en agriculture** constituent une autre approche intégrée pour accroître les rendements, améliorer la fertilité des exploitations et s'adapter aux effets du changement climatique en favorisant des interactions biologiques positives et des synergies entre différentes parties du système agricole. Dans le même temps, de tels systèmes peuvent apporter des avantages plus larges, tels qu'une meilleure nutrition humaine, la création de nouveaux emplois et l'augmentation des revenus des agriculteurs (Pretty *et al.*, 2006 ; De Schutter, 2010).

Les **changements climatiques sont déjà évidents** dans de nombreuses régions du monde, et les rendements des cultures sont déjà affectés négativement par l'augmentation des sécheresses, les événements climatiques extrêmes, les changements de saison, etc. L'agriculture devra contribuer à l'atténuation des changements climatiques en réduisant la quantité de gaz à effet de serre émis, mais il est tout aussi important d'examiner comment les systèmes agricoles peuvent s'adapter aux changements climatiques et devenir plus résistants.

L'atténuation et l'adaptation au changement climatique doivent aller de pair, et des approches doivent être envisagées pour maximiser les synergies potentielles et réduire les compromis. Les pratiques de conservation des sols, l'agriculture de conservation, l'agroforesterie, les systèmes sylvo-pastoraux, l'agro-écologie, l'agriculture respectueuse du climat et d'autres approches peuvent combiner l'atténuation et l'adaptation climatiques, et d'autres objectifs de sécurité alimentaire, de développement et de conservation (p. ex., la diversification des revenus agricoles ou la protection des pollinisateurs).

Il est recommandé de **mettre davantage l'accent sur les approches intégrées** des paysages pour que l'agriculture tropicale contribue aux objectifs d'atténuation du changement climatique, à la sécurité alimentaire et à la fourniture accrue de services écosystémiques tels que la séquestration du carbone ou la protection de la biodiversité (Harvey *et al.*, 2014). Pour une étude de cas sur les avantages combinés de la culture intercalaire café-banane sur l'atténuation et l'adaptation au changement climatique, les moyens de subsistance des agriculteurs et les risques en Afrique, voir van Asten *et al.*, 2015⁴³.

Il est également **important d'adopter une approche holistique des défis interdépendants** dans les secteurs de l'utilisation des terres, notamment le changement climatique, la sécurité alimentaire, l'utilisation des terres, la production alimentaire durable, les régimes alimentaires sains et la conservation de la biodiversité, en raison du grand potentiel de compromis et de synergies.

L'identification et la reconnaissance explicites de ces compromis et synergies dans la gouvernance et l'élaboration des politiques peuvent aider à surmonter les obstacles à la mise en œuvre des meilleures pratiques. Les décisions en matière de gestion des terres sont prises à de multiples niveaux (exploitations agricoles, niveaux régional et national, différents secteurs et services gouvernementaux), et la participation de toutes les parties prenantes concernées est nécessaire pour prendre des décisions efficaces (GIEC, 2019).

Enfin, **l'ensemble de notre système alimentaire doit devenir plus durable**. Cela comprend des changements non seulement à la production végétale et animale, mais aussi à l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement, à notre comportement de consommation, aux pertes et aux gaspillages alimentaires, ainsi qu'un déplacement de notre alimentation vers des régimes alimentaires moins gourmands en GES et en ressources.

43 cgispace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/69017/CCAFSpbCoffee-Banana.pdf.



Chapitre 5

Étude de cas

Une étude de cas – Pourquoi ? Comment ?	118
Partie 1 : Mise en situation	120
Partie 2 : Analyse du scénario	127
Partie 3 : Recherche de solutions appropriées	135
Partie 4 : Plan d'action proposé	145

Objectifs pédagogiques

À l'issue de ce chapitre, l'apprenant sera capable :

- D'analyser un scénario proche de la réalité
- De déterminer les sources, directes ou indirectes, des émissions de gaz à effet de serre à la ferme comme à l'extérieur de la ferme, sur base des connaissances théoriques acquises
- De proposer un ensemble de solutions appropriées pour réduire les émissions de gaz à effet de serre liées aux produits élaborés dans les fermes étudiées
- D'élaborer un plan d'action cohérent pour s'attaquer aux principales sources d'émissions de gaz à effet de serre et améliorer ainsi la durabilité des pratiques

1. UNE ÉTUDE DE CAS – POURQUOI ? COMMENT ?

1.1. Pourquoi une étude de cas ?

Travailler à partir de la description d'un cas théorique ne remplacera jamais votre expérience professionnelle, forgée sur le terrain et au contact de la réalité des producteurs. Cependant, il est possible d'**acquérir, à travers un exemple tiré de situations déjà rencontrées, des principes méthodologiques** pour analyser la situation, déterminer la nature et l'origine de certains problèmes qui peuvent être rencontrés par ces derniers, pouvoir proposer des pistes de solutions qui soient efficaces, rentables et compatibles avec les objectifs de durabilité.

Voici un exercice pour vous entraîner !

Une étude de cas ne doit pas servir à proposer une « recette toute faite » dont les ingrédients seraient toujours les mêmes solutions à recommander aux producteurs. Au contraire, elle doit vous permettre de **comprendre la complexité des situations qui peuvent exister et qui nécessite une approche au cas par cas**, avec des solutions appropriées et adaptée à chacune des situations, et aux ressources disponibles localement. **Il faut aider le producteur à comprendre le « pourquoi » de ses problèmes et à déterminer lui-même « comment » une amélioration durable de la situation est possible** en faisant la balance coût-bénéfice de chaque solution théoriquement possible.

1.2. Comment pouvez-vous utiliser cette étude de cas pour examiner les divers aspects des émissions de gaz à effet de serre (GES) dans l'agriculture et l'horticulture, et appliquer ce que vous avez appris à un cas qui pourrait être rencontré dans la pratique ?

L'étude de cas comporte **quatre parties**, qui sont autant d'étapes dans **l'exercice à réaliser**.

- 1) **Une mise en situation** : par la lecture d'un scénario, il s'agira d'identifier les informations utiles à comprendre une situation que pourrait rencontrer une entreprise horticole (dans le cas présent, concernant les émissions de GES liées à la production horticole).

- 2) **Une analyse du scénario** : pour identifier les causes et proposer des solutions à l'entreprise, il faudra analyser la situation telle que décrite et identifier les pratiques susceptibles d'entraîner des émissions importantes de GES.
- 3) **Une identification des solutions appropriées** : il s'agira de faire l'inventaire des solutions qui devraient être appropriées pour régler chaque problème identifié séparément ; ensuite de voir pour chaque solution si elle est : 1) efficace ; 2) rentable ; 3) accessible ; 4) durable.
- 4) **Une proposition d'un plan d'action pour l'entreprise** : il s'agira d'établir une stratégie de mise en œuvre intégrant les solutions retenues, afin d'améliorer durablement la situation et de réduire les émissions de GES.

Pour profiter de cette étude de cas, **vous devez suivre les consignes et réaliser chacune des étapes comme un exercice personnel**, en vous aidant des éléments théoriques contenus dans le manuel, mais aussi en consultant les sites Web et les références utiles mentionnées dans ce manuel.

À chaque étape, **vous aurez ainsi des consignes, puis un corrigé**. Vous verrez donc le message suivant :

« Vous avez réalisé votre partie de l'exercice ? Bravo ! Comparez maintenant votre résultat au corrigé proposé, identifiez les différences et essayez de voir pourquoi votre résultat diffère de ces propositions. Mais peut-être avez-vous imaginé une nouvelle et/ou une meilleure proposition ? Rédigez en quelques lignes votre analyse des résultats et votre perception personnelle : cela vous aidera en fin d'exercice à retracer la logique de votre démarche ».

Conseil avant de commencer : Imprimer les pages de ce chapitre vous facilitera le travail.



2. PARTIE 1 : MISE EN SITUATION

Consigne

Lisez attentivement ce récit décrivant une entreprise horticole. Identifiez, dans la situation décrite, les éléments clés qui contribuent à l'émission de GES et les autres problèmes de pollution atmosphérique.

Si nécessaire, imprimez cette page pour la relire plusieurs fois.

(Avertissement : il s'agit d'un cas fictif ; toute ressemblance avec des situations, des personnes ou des noms commerciaux réels est entièrement fortuite.)

2.1. Exposé du cas

Depuis plus de dix ans maintenant, à la suite du décès de son père qui était maraîcher, comme avant lui son grand-père, Dieudonné Shamba est le manager de l'entreprise familiale FRUITVERTS SARL. C'est une entreprise de taille moyenne (environ 15 ha) établie en périphérie d'une grande ville et à proximité de quelques villages où sont écoulés toute l'année une bonne part de ses légumes. Cette entreprise produit sur son périmètre certains de ses produits (surtout des haricots verts et des tomates cerises), mais elle travaille aussi avec les nombreux petits producteurs des environs qui lui fournissent tout au long de l'année des fruits (mangues) et certains légumes (gombos, choux, piments, tomates, amarante...). Dans sa station de conditionnement, elle trie et emballe les produits destinés au marché régional et d'exportation. Une partie des tomates achetées aux producteurs locaux sont aussi transformées sur place (séchées) et conditionnées. À peine 30 km séparent l'entreprise de son principal marché local (en ville) et du grand port d'où sont expédiés ses produits de luxe (mangues, haricots verts filets et tomates cerises) vers l'Europe.

Dans le périmètre de FRUITVERTS, on trouve deux zones de culture : une partie de l'exploitation (8 ha), la plus éloignée de la bande côtière, est constituée des terres les plus hautes, qui sont assez planes et divisées en grands carrés séparés par des fossés d'irrigation. Jusqu'à présent, les sols, quoique argilo-sableux, étaient assez fertiles pour qu'on y installe les cultures destinées à l'exportation. On y fait donc chaque année, entre septembre et mars-avril, du haricot vert (6 ha), destiné au marché français, et de la tomate cerise (2 ha) pour le marché hollandais, les cultures se répétant sur les mêmes parcelles d'année en année.



Figure 1 – Cultures cultivées sur les hautes terres (haricots et tomates cerises)

Le reste des terres, plutôt sablonneuses (environ 7 ha), descend en pente douce vers le littoral. Ces terres sont parcourues de fossés creusés par l'érosion. Comme elles étaient considérées moins fertiles, des cultures de divers légumes (surtout de la tomate, du piment et du gombo), destinés aux marchés environnants, sont installées sur la pente. Les cultures sont réparties par petites surfaces de quelques ares, autrefois séparées par des haies, mais qui, pour la plupart, ont aujourd'hui disparu. Ces petits carrés occupent les terres du sommet du talus jusqu'au bas de la pente, où une grande mare sert de réservoir d'eau pour irriguer ces cultures. Sur la pente, Dieudonné a planté quelques arbres pour retenir les terres et fournir un peu d'ombre à ses pépinières. Aussi loin qu'il s'en souvienne, Dieudonné a toujours connu cette répartition des cultures. Les villages environnants s'étalent sur la bande côtière le long de la grande route qui va vers la ville. Chaque villageois possède un petit verger de manguiers et quelques carrés où sont cultivés des tomates, melons, aubergines..., du maïs, du sorgho et des arachides selon la saison.



Figure 2 – Carré cultivé par un petit exploitant

Depuis deux ou trois ans, Dieudonné constate, en examinant ses comptes, que le revenu qu'il tire de son exploitation a beaucoup diminué. Pourtant, les prix de vente auraient plutôt tendance à augmenter avec le développement des villages et de la grande ville qui sont très demandeurs de fruits et de légumes. Force est de constater que, globalement, c'est sa production qui a chuté ! Son entreprise a produit bien moins de haricots et de tomates cerises (ce sont les cultures où le rendement a le plus chuté), et il a également connu une réduction de la qualité de ses produits, avec une part plus faible de la production totale convenant à l'exportation. Pour les autres cultures (tomates, gombo ou piment), la chute de production n'a pas été aussi spectaculaire, mais elle n'atteint plus les niveaux des années précédentes, malgré les achats répétés d'engrais et de produits phytosanitaires. Malheureusement, les petits producteurs n'ont pas pu compenser le déficit de sa production, même s'il les a incités à produire le plus possible en augmentant leurs surfaces et s'il leur a distribué de l'engrais composé et des produits phytosanitaires.

Dieudonné a augmenté la surface de production en convertissant la végétation semi-naturelle présente, comme les friches arbustives, en de nouvelles parcelles disponibles pour la culture. La collecte des fruits et légumes que les petits paysans fournissent

est inefficace, avec des meurtrissures des fruits et légumes frais pendant le voyage, en partie dues à une mauvaise logistique qui augmente le temps passé sur la route et à un emballage inadapté qui ne protège pas suffisamment les produits. Les haricots verts et les tomates cerises doivent être entreposés à la ferme de Dieudonné avant d'être exportés ; cependant, cet entreposage n'est pas refroidi, ce qui entraîne une certaine perte de produits, de qualité et de valeur marchande.

Pour produire ses haricots verts et ses tomates cerises, Dieudonné prépare soigneusement ses terres avec son tracteur, au moyen d'un labour à 30 à 40 cm pour enfouir les mauvaises herbes et les résidus des cultures précédentes (notamment du maïs cultivé en saison humide). Dieudonné n'a pas lésiné non plus avec les intrants. Il n'a pas hésité à augmenter les quantités d'engrais NPK épandues (100-100-300) en plus du fumier frais qu'il enfouit avec le labour. Il a veillé à traiter plusieurs fois sur la saison ses cultures avec des produits phytosanitaires (insecticides, fongicides) pour espérer augmenter ses rendements. Depuis deux ans, il applique même des herbicides sélectifs en haricot, en tomate, et même en maïs (atrazine), pour garder son sol propre et limiter la concurrence des mauvaises herbes. Il applique de la tourbe pour améliorer le pH du sol. Enfin, il a aussi augmenté, ces cinq dernières années, les apports d'eau d'irrigation pour que les haricots et les tomates profitent pleinement de ses engrais et de ses traitements phytosanitaires. Il a donc installé une plus grosse moto-pompe sur la mare pour pouvoir irriguer plus souvent les haricots verts et les tomates en remplissant d'eau les rigoles qui serpentent dans ses champs. Rien n'y fait.

Ses plantes sont parfois attaquées par des maladies (fusariose, p. ex.) qui sont traitées avec des fongicides, mais, en général, les feuilles de ses haricots et tomates sont plutôt d'un vert très foncé. Par contre, lors des périodes de forte chaleur, elles ont tendance à se flétrir plus rapidement. Dieudonné a arraché quelques plantes, mais il n'a pas trouvé sur les racines de trace de nématodes à galles ou de pourriture au collet. Il ne comprend pas ce qu'il se passe.

Les efforts de Dieudonné ne portent manifestement pas leurs fruits. Il lutte contre la baisse des rendements et augmente son utilisation d'intrants pour tenter de contrer cette tendance. Cela a entraîné une augmentation des émissions de GES de sa ferme et de ses produits.

Il aurait bien besoin de l'aide d'un spécialiste. Pouvez-vous l'aider ?

- Sur une feuille de papier, essayez **de trier et de lister les problèmes** décrits (sans lire la suite).
- Faites la liste **des observations, des analyses et des mesures qui seraient à réaliser** pour poser un diagnostic.

2.2. Analyse de la situation décrite

Vous avez réalisé votre partie de l'exercice ? Bravo ! Comparez maintenant votre résultat au corrigé proposé, identifiez les différences et essayez de voir pourquoi votre résultat diffère de ces propositions. Mais peut-être avez-vous imaginé une nouvelle et/ou une meilleure proposition ? Rédigez en quelques lignes votre analyse des résultats et votre perception personnelle : cela vous aidera en fin d'exercice à retracer la logique de votre démarche.

Corrigé proposé

■ Informations à tirer de la lecture de l'énoncé

- Les rendements ont diminué ces dernières années.
- L'entreprise connaît également une baisse de la qualité des produits, avec une part croissante de légumes de qualité inférieure qui ne sont pas adaptés au marché de l'exportation.
- Dans le même temps, l'utilisation des intrants, en particulier les engrais minéraux, les pesticides et l'irrigation, a augmenté.
- La baisse des rendements est principalement due à une baisse de la fertilité des sols de l'exploitation, due à un certain nombre de pratiques inappropriées : surutilisation des intrants, absence de rotations appropriées des cultures, irrigation inappropriée, compactage du sol, pH élevé, mauvaise gestion des intrants de matière organique, érosion des sols due à l'absence de structures de protection telles que les haies, impacts négatifs des pesticides appliqués sur la vie du sol, etc.
- Les engrais minéraux sont surdosés, et les quantités et les rapports des différents éléments nutritifs entre eux ne correspondent pas aux besoins des cultures, pas plus qu'aux recommandations des meilleures pratiques.
- Le fumier frais est épandu pendant la préparation du sol.
- Les pesticides sont appliqués plusieurs fois par saison et en grandes quantités. Aucune lutte intégrée contre les ravageurs n'est mise en œuvre.
- De grandes quantités d'eau sont appliquées pendant l'irrigation.
- Les haies et les arbres ont largement disparu de la ferme.
- L'érosion du sol par le vent et l'eau entraîne une perte de sol productif.
- La tourbe est utilisée pour corriger le pH du sol.
- Les petits producteurs qui fournissent l'entreprise ont été encouragés à accroître leur utilisation d'intrants, mais n'ont pas réussi non plus à augmenter leur production.
- Les petits producteurs sont même encouragés à augmenter leur surface de production. Ils y sont parvenus en convertissant des terres inutilisées de végétation semi-naturelle en terres agricoles.
- La logistique du transport des produits des petites exploitations agricoles jusqu'à la ferme de Dieudonné est organisée de manière inefficace.

■ Observations, analyses et mesures à suggérer

- Essayez d'identifier les **principales sources** d'émissions de GES sur cette ferme en tenant compte des **sources typiques d'émissions** à la fois à la ferme (ex. : consommation d'énergie pour les opérations sur le terrain, sols fertilisés) et hors de la ferme (ex. : pendant la production et le transport des intrants externes jusqu'à la ferme).
- Les suggestions d'observation suivantes viseront à comprendre pourquoi les niveaux de rendement diminuent. Si les niveaux de rendement peuvent être de nouveau améliorés tout en maintenant les niveaux actuels d'utilisation des

intrants ou même en les réduisant, l'empreinte carbone par unité de production diminuera. Il est intéressant de suggérer de :

- créer un profil de sol de plus de 50 cm ;
- observer la couleur du sol ;
- observer la présence de « tunnels » dans le sol (dus aux vers de terre) et la présence d'autres animaux dans le sol ;
- effectuer une analyse du sol pour déterminer la teneur en éléments nutritifs ;
- mesurer la teneur en matière organique ;
- mesurer le pH du sol ;
- mesurer la conductivité électrique du sol.

■ Résultats des analyses, mesures et observations

- L'utilisation des intrants est trop élevée par rapport aux rendements obtenus.
- Les engrais minéraux et organiques sont utilisés de manière inefficace et inappropriée.
- La consommation d'énergie liée à l'irrigation est élevée, en particulier depuis l'installation de la nouvelle unité de pompage et l'augmentation de la quantité d'eau d'irrigation utilisée.
- L'augmentation de l'utilisation des intrants et la diminution des rendements signifient que l'efficacité de l'utilisation des intrants est en baisse. Cette inefficacité entraîne des émissions élevées de GES par hectare et une forte empreinte carbone liée au produit (kg CO₂/unité de produit). L'empreinte carbone liée au produit a augmenté ces dernières années.
- Elle entraîne également d'autres impacts négatifs sur l'environnement (p. ex., le lessivage de l'azote dans les nappes phréatiques et les pesticides qui polluent l'atmosphère et l'eau d'irrigation) et a un impact négatif sur la situation économique de l'entreprise.
- Les petits producteurs fournisseurs convertissent des terres semi-naturelles à la production horticole et utilisent de plus en plus d'intrants.
- La **Figure 8** (ci-après) montre la contribution en pourcentage des différentes sources d'émissions de GES sur la ferme de Dieudonné et les fermes des petits producteurs (exemple hypothétique basé sur la description des fermes).
- Les niveaux de rendement diminuent, ce qui augmente l'empreinte carbone liée au produit. Les observations et résultats de l'analyse du sol peuvent aider à résoudre ce problème :
 - en réalisant un profil du sol sur 50 cm, que la profondeur de l'horizon superficiel (horizon A) est limitée à 20-30 cm au plus ; on observe une zone de discontinuité à environ 30 cm (horizon plus foncé au-dessus d'un horizon beaucoup plus clair) ;
 - on observe que le sol est brun, voire brun foncé (couleur due à l'argile et à la MO présente) ;
 - on observe très peu de galeries dans le sol, peu d'insectes et peu de vers de terre ;
 - on observe des résidus des cultures précédentes peu décomposés.

Bulletin d'analyse du sol (en mg/kg) :

N	P (P2O5)	K (K2O)	Ca (CaO)	Mg (MgO)
688	339	834	4,445	388

Analyse de la teneur en matière organique (résultat : **MO = 4,60 %**).

Mesure du pH du sol (résultat : **pH eau = 8,8**).

Mesure de conductivité électrique (résultat : **EC = 3,56 dS/m**).

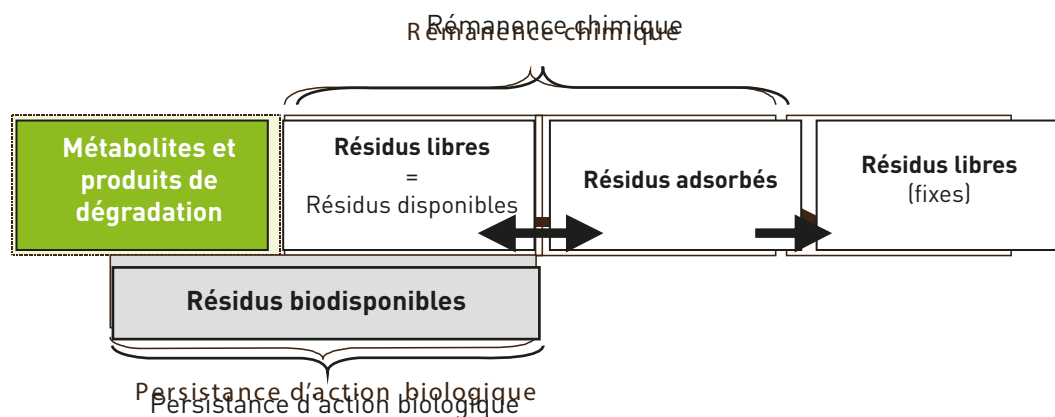


Figure 8 – Pourcentage de contribution des différentes sources d'émissions de gaz à effet de serre (GES) de la ferme de Dieudonné (en haut) et des fermes des petits producteurs (en bas).

[illegible]

3. PARTIE 2 : ANALYSE DU SCÉNARIO

3.1. Consignes pour l'analyse

Consigne

Pour aider Dieudonné, il faut analyser les causes de l'empreinte carbone élevée et de la faible productivité de son entreprise.

Travaillez avec deux outils : un tableau et un arbre des causes. Commencez par compléter le tableau (au besoin, ajoutez des lignes et des colonnes dans le tableau. N'oubliez pas d'utiliser les résultats des analyses de sol et des mesures (pH, CE, MO).



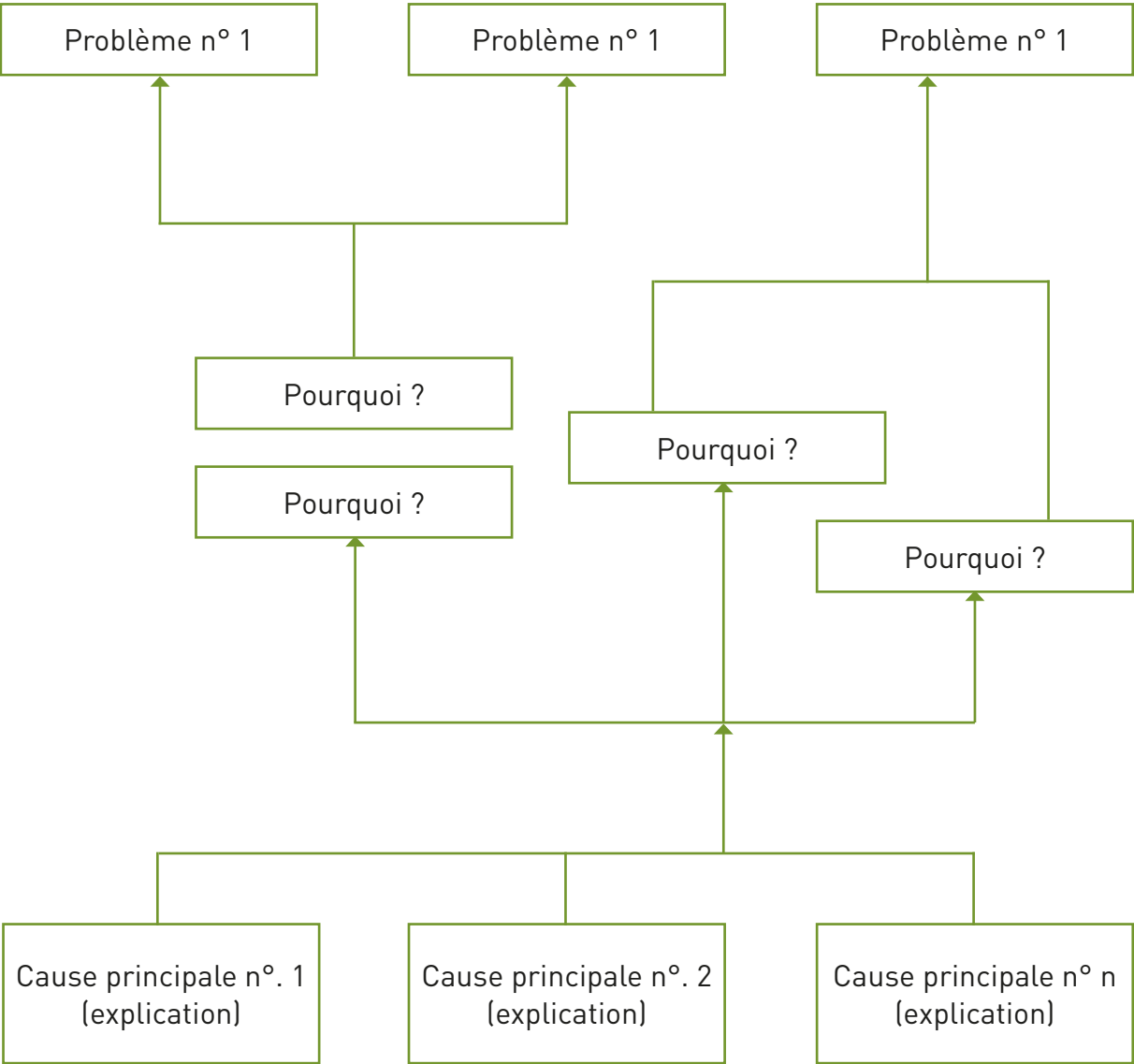
Quand c'est terminé, réalisez l'arbre des causes sous la forme d'un diagramme (type flow-chart comme sur le modèle) en commençant par mettre les problèmes identifiés dans les cases du dessus et en indiquant dans les cases en dessous la (ou les) cause(s) probable(s).

Tableau (exemple à imprimer et à compléter)

Problème identifié (constat, observation)	Tentative d'explication	Identification de la (ou des) cause(s) probable(s)

Arbre des causes (exemple de diagramme à construire et à compléter)

Partir des constats (problèmes observés) et remonter aux sources (multiples parfois) qui expliquent l'origine de chaque problème. À la racine, un certain nombre de causes profondes, plus générales.



3.2. Analyse des causes : résultat proposé

Vous avez réalisé votre partie de l'exercice ? Bravo ! Comparez maintenant votre résultat au corrigé proposé, identifiez les différences et essayez de voir pourquoi votre résultat diffère de ces propositions. Mais peut-être avez-vous imaginé une nouvelle et/ou une meilleure proposition ? Rédigez en quelques lignes votre analyse des résultats et votre perception personnelle : cela vous aidera en fin d'exercice à retracer la logique de votre démarche.

Corrigé proposé : tableau

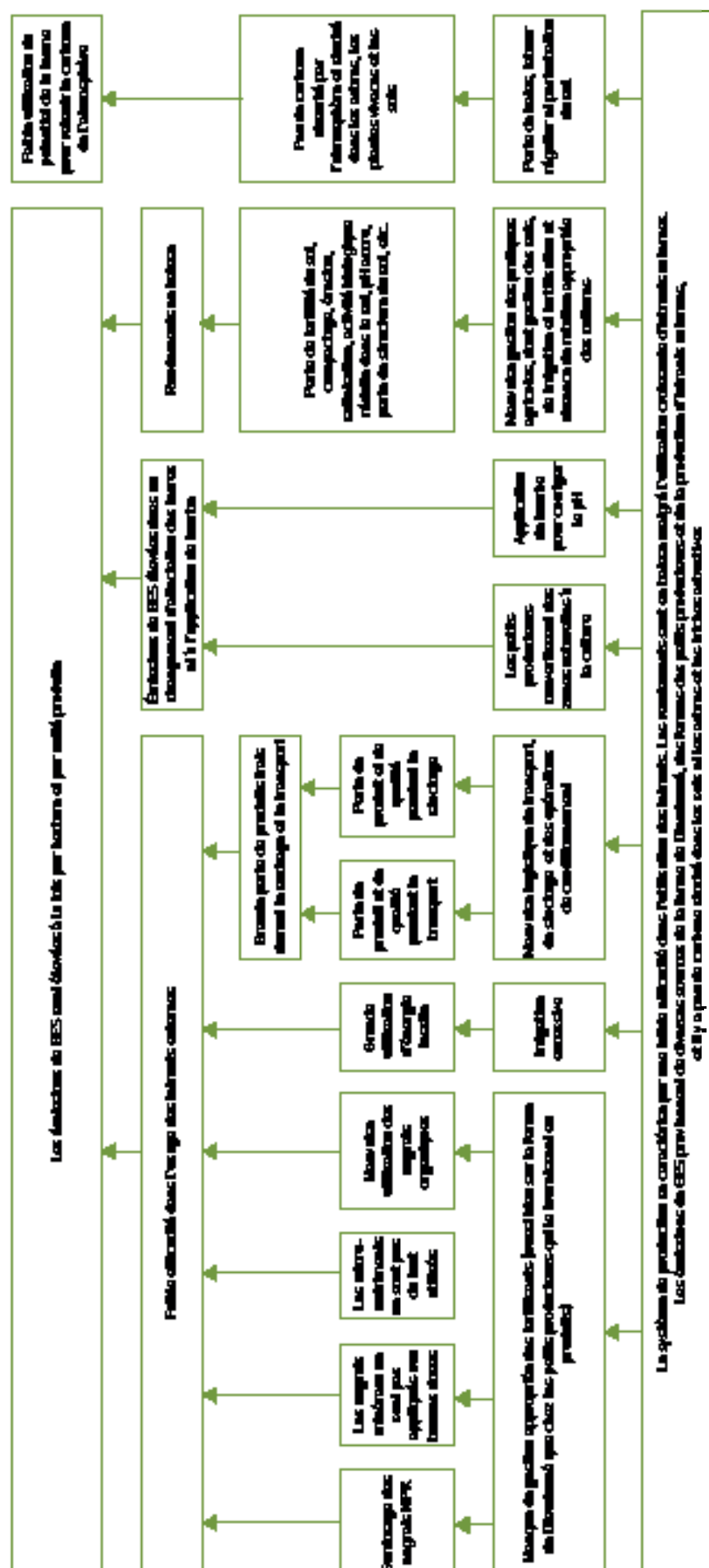
Problèmes identifiés (constat, observation)	Tentative d'explication	Identification de la (ou des) cause(s) probable(s)
L'empreinte carbone par unité de produit a augmenté	L'empreinte carbone des produits de Dieudonné et de ses petits fournisseurs a augmenté en raison de la baisse des rendements et de l'utilisation accrue des intrants.	<p>L'augmentation de l'empreinte carbone du produit est due à deux facteurs principaux :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) l'intensité de l'utilisation des intrants a augmenté, ce qui entraîne une augmentation des émissions de GES provenant de la production, du transport et de l'utilisation de ces intrants en termes absolus (par hectare) ; 2) dans le même temps, le rendement récolté a diminué. <p>La combinaison de ces deux facteurs signifie que l'empreinte carbone liée au produit a augmenté parce que plus d'intrants produisent moins de résultats, c'est-à-dire que le système est devenu moins efficace.</p>
Les émissions de GES liées à la fertilisation minérale sont élevées	<p>La gestion des engrais minéraux de Dieudonné est inappropriée et excessive. Il a augmenté les quantités d'engrais minéraux apportées en raison de la baisse observée des rendements.</p> <p>Ses pratiques de fertilisation se caractérisent par une sur-application de nutriments. Il n'utilise que des engrais NPK.</p> <p>Il apporte des engrais minéraux peu de temps avant d'irriguer ses champs.</p>	<p>Dieudonné applique des quantités excessives d'engrais minéraux. Il applique plus de nutriments qu'il n'en faut pour remplacer les nutriments qui sont exportés à chaque récolte. Il ne parvient pas non plus à équilibrer les différents nutriments (p. ex., trop de potassium par rapport à l'azote et au phosphore) et n'inclut pas les micronutriments (p. ex., le calcium et le magnésium) qui sont nécessaires pour produire des cultures saines et à haut rendement.</p> <p>En raison de la sur-irrigation de sa ferme et du mauvais timing des événements d'irrigation, Dieudonné risque de perdre une partie des nutriments appliqués en raison du lessivage.</p> <p>Dans l'ensemble, sa fertilisation est très inefficace. L'excès d'application et les mauvaises pratiques de fertilisation signifient que les émissions de GES liées à la production, au transport et à l'utilisation d'engrais minéraux sont élevées par rapport au rendement obtenu, ce qui conduit à une empreinte carbone élevée par unité de production et, dans l'absolu, à des émissions très élevées de GES par hectare.</p>

<p>Les engrais organiques sont utilisés de façon inappropriée</p>	<p>Dieudonné applique des engrais organiques, mais pas selon les meilleures pratiques. Cela signifie qu'elles ne contribuent pas autant que possible à l'augmentation des rendements et que les émissions de GES dues à la fertilisation organique sont trop élevées pour les rendements obtenus.</p>	<p>Le fumier frais qui n'est pas complètement décomposé est appliqué et incorporé dans le sol avant la culture des haricots et des tomates, ce qui n'est pas recommandé. L'utilisation intensive de pesticides a un impact négatif sur la vie du sol, de sorte que la décomposition de la matière organique est ralentie, ce qui signifie qu'elle ne peut contribuer à la fertilité du sol autant qu'elle le pourrait.</p>
<p>Consommation d'énergie liée à l'irrigation et aux opérations sur le terrain</p>	<p>Le système d'irrigation nécessite de l'énergie fossile pour pomper l'eau de l'étang vers les champs, et les tracteurs et autres machines agricoles consomment du diesel.</p>	<p>La consommation d'énergie fossile est élevée à la ferme de Dieudonné parce qu'il pompe beaucoup d'eau pour l'irrigation et qu'il effectue des opérations sur le terrain, comme le labourage et l'application d'engrais. Comme il applique trop d'engrais minéraux, il utilise plus d'énergie qu'il n'en faut pour la fertilisation.</p>
<p>Peu de séquestration du carbone à la ferme dans les sols, les arbres et les haies</p>	<p>Dieudonné connaît des problèmes de fertilité des sols et de teneur en matière organique du sol. Ses sols plats des hautes terres sont sujets à l'érosion par le vent et l'eau. La ferme n'utilise pas son potentiel pour retenir le carbone de l'atmosphère dans les sols et les arbres.</p>	<p>Les sols de Dieudonné sont sujets à l'érosion éolienne et hydrique en raison de l'absence de structures de protection, comme les arbres et les haies. Les puits de carbone à la ferme peuvent retenir le carbone de l'atmosphère et inclure les sols, les arbres et les haies. Cependant, Dieudonné a enlevé les haies qui séparaient les champs et perd du carbone dans le sol à cause de l'érosion.</p>
<p>Les petits producteurs fournisseurs convertissent la végétation semi-naturelle pour agrandir leurs surfaces cultivées</p>	<p>Les petits producteurs qui approvisionnent Dieudonné sont confrontés à une baisse des rendements et sont encouragés à augmenter leur surface de production.</p>	<p>Les petits producteurs augmentent leur production en convertissant la végétation semi-naturelle telle que les friches arbustives en parcelles agricoles. Cette conversion entraîne l'émission de grandes quantités de GES parce que le carbone qui était auparavant stocké dans la végétation et les sols en surface est rejeté dans l'atmosphère lors de la conversion.</p>

<p>Le système de production des petits producteurs libère de grandes quantités de GES</p>	<p>L'empreinte carbone des fruits et légumes produits par les petits producteurs pour Dieudonné est élevée.</p>	<p>Le système de production des petits producteurs partage plusieurs problèmes avec la ferme de Dieudonné.</p> <p>Les petits producteurs ont été encouragés à utiliser davantage d'intrants, notamment des engrais minéraux et des pesticides.</p> <p>Cependant, les rendements diminuent et la fertilité des sols diminue.</p> <p>Cela signifie que le système de production n'est pas efficace pour convertir les intrants externes en rendements, ce qui entraîne une empreinte carbone élevée par unité de produit.</p> <p>L'utilisation élevée de pesticides cause également des problèmes de pollution de l'environnement et de l'air, et a des impacts négatifs sur les niveaux de fertilité des sols.</p>
<p>Émissions de GES relativement élevées dues à la logistique</p>	<p>Le transport des produits frais des petits paysans à la ferme de Dieudonné est inefficace et caractérisé par des émissions de GES relativement élevées.</p>	<p>Le transport s'effectue chaque fois que des produits frais ont été récoltés, et il y a peu de coordination entre les différents petits producteurs.</p>
<p>Pertes importantes de fruits et légumes frais pendant le transport et le stockage</p>	<p>Une part importante des fruits et légumes provenant des petits paysans arrive à la ferme de Dieudonné avec des meurtrissures et une perte de qualité.</p> <p>Un plus grand nombre de produits sont endommagés et perdus pendant l'entreposage.</p> <p>De telles pertes représentent un gaspillage de ressources et les émissions de GES associées à la culture de ce produit n'ont servi à rien.</p>	<p>Les raisons de la perte et de la qualité des produits sont les suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • dommages mécaniques dus à la mauvaise manutention et aux routes accidentées ; • retards dans le transport des produits frais en raison de goulets d'étranglement, de mauvaises conditions météorologiques ou d'une mauvaise coordination logistique ; • matériaux d'emballage inadaptés qui ne protègent pas adéquatement les fruits et légumes pendant le transport ; • manque de stockage à froid des produits les plus périssables.

<p>L'emballage et la transformation libèrent des gaz à effet de serre</p>	<p>En raison de la consommation d'énergie fossile, la station de conditionnement émet des GES et d'autres polluants atmosphériques.</p>	<p>Les émissions liées au tri et à l'emballage des produits contribuent aux émissions de GES, principalement en consommant de l'énergie fossile.</p> <p>La station de conditionnement consomme de grandes quantités d'énergie, ce qui suggère des processus inefficaces.</p> <p>Les matériaux d'emballage ont également leur propre empreinte carbone (c.-à-d. les émissions de GES liées à la fabrication et au transport des matériaux).</p>
<p>D'importantes pertes de carbone résultent de l'utilisation de la tourbe pour corriger le pH du sol.</p>	<p>Dieudonné applique de la tourbe pour tenter de corriger le pH du sol qui est trop élevé.</p>	<p>La mauvaise gestion de l'irrigation par Dieudonné est la cause principale de la salinisation des sols, ce qui a entraîné une augmentation du pH. Aujourd'hui, le pH est si élevé qu'il cause des problèmes pour certaines des cultures qu'il produit. Il applique de la tourbe pour réduire de nouveau le pH, bien que ce matériau ne soit pas recommandé à cette fin et ait donc peu d'effet positif.</p>
<p>La surutilisation des pesticides entraîne la pollution de l'atmosphère, des sols et des plans d'eau.</p>	<p>Les pesticides ne sont pas utilisés avec parcimonie et seulement en cas de besoin, mais sont appliqués en grande quantité sur toutes les cultures, même en l'absence de ravageurs ou de maladies.</p>	<p>Les pesticides peuvent contribuer à la pollution de l'air parce qu'ils pénètrent dans l'atmosphère par dérive pendant l'application ou par volatilisation des cultures et des sols.</p> <p>Les composés organiques volatils libérés dans l'atmosphère par les pesticides peuvent réagir avec d'autres produits chimiques pour former de l'ozone qui est l'un des polluants atmosphériques les plus nocifs pour les plantes et un facteur important du réchauffement planétaire.</p> <p>Les pesticides peuvent également perturber la flore et la faune du sol, ce qui contribue à la perte de fertilité du sol, réduit l'infiltration de l'eau dans le sol et augmente l'érosion du sol, et pollue les sols et les plans d'eau (p. ex., par ruissellement dans les milieux aquatiques).</p>

Corrigé proposé : arbre des causes



[illegible]

4. PARTIE 3 : RECHERCHE DE SOLUTIONS APPROPRIÉES

4.1. Consignes pour la recherche de solutions

Consigne

Pour aider Dieudonné, il faut lui proposer des solutions appropriées pour traiter chaque problème identifié. Travaillez en deux temps : listez brièvement les solutions possibles à chacun des problèmes dans un tableau. Vérifiez ensuite si ces solutions sont efficaces, rentables, accessibles et durables (pour chaque solution, évaluez ces 4 critères et attribuez-leur une note entre 1 et 4).



Tableau 1 (exemple à compléter)

Problèmes identifiés (constat, observation)	Proposition(s) de solution(s) (ajoutez quelques explications)
L'empreinte carbone par unité de produit a augmenté	S1 :
Les émissions de GES liées à la fertilisation minérale sont élevées	S2 : S3 :
Les engrais organiques sont utilisés de façon inappropriée	S4 : S5 : S6 :
Consommation d'énergie liée à l'irrigation et aux opérations culturales	S7 :
Peu de séquestration du carbone à la ferme dans les sols, les arbres et les haies	S8 : S9 :
Les petits producteurs convertissent la végétation semi-naturelle pour agrandir leurs surfaces cultivées	S10 :
Le système de production des petits producteurs libère de grandes quantités de GES	S11 :

Émissions de GES relativement élevées dues à la logistique	S12 : S13 :
Pertes importantes de fruits et légumes frais pendant le transport et le stockage	S14 :
L'emballage et la transformation libèrent des gaz à effet de serre	S15 : S16 :
D'importantes pertes de carbone résultent de l'utilisation de la tourbe pour corriger le pH du sol.	S17 :
La surutilisation des pesticides entraîne la pollution de l'atmosphère, des sols et des plans d'eau.	S18 : ...

Tableau 2 (exemple à compléter)

Solutions proposées	Efficace	Rentable	Accessible	Durable	Score
S1	4	2	3	4	13
S2	2	3	4	1	10
S3	4	4	1	2	11
S4	4	2	4	4	14
S5	...	...	...	...	...
S6	...	...	...	...	...
S...	...	...	...	...	...
Sn	...	...	...	...	...

(1 : faible ; 2 : moyen ; 3 : bon ; 4 : excellent)

4.2. Recherche de solutions appropriées : résultat proposé

Vous avez réalisé votre partie de l'exercice ? Bravo ! Comparez maintenant votre résultat au corrigé proposé, identifiez les différences et essayez de voir pourquoi votre résultat diffère de ces solutions. Mais peut-être avez-vous imaginé une nouvelle et/ou une meilleure solution ? Rédigez en quelques lignes votre analyse des résultats et votre perception personnelle : cela vous aidera en fin d'exercice à retracer la logique de votre démarche.

Corrigé proposé : propositions de solutions

Problèmes identifiés (constat, observation)	Proposition(s) de solution(s)
L'empreinte carbone par unité de produit a augmenté	<p>S1 : Revoir les pratiques de gestion actuelles pour identifier toutes les raisons qui contribuent à une baisse des rendements et adopter les meilleures pratiques de gestion pour améliorer de nouveau les rendements sans augmenter l'utilisation des intrants ou même la diminuer, le cas échéant.</p> <p>L'empreinte carbone d'un produit (ECP) est une estimation de la quantité de GES émise lors de la production d'un produit, en l'occurrence les cultures horticoles. Ils sont exprimés par unité de rendement et sont donc un indicateur de l'efficacité du système. Étant donné que toutes les émissions de GES qui en résultent sont liées à l'unité de production, par exemple, par kg de tomates, le résultat d'une analyse de l'empreinte carbone du produit est influencé par la productivité d'un système agricole. Si un système est très efficace pour convertir tous les intrants (p. ex., les engrais minéraux) en extrants et que l'énergie est utilisée efficacement, il en résulte une empreinte carbone du produit plus faible que pour un système inefficace. Plus la sortie est élevée par rapport aux entrées, plus l'ECP sera basse. Afin de réduire l'empreinte carbone d'un produit, il est donc important de maximiser les niveaux de rendement à n'importe quelle intensité d'utilisation des intrants, c'est-à-dire d'accroître l'efficacité de la production.</p> <p>Sur la ferme de Dieudonné, il y a plusieurs problèmes qui entraînent une baisse des rendements malgré l'augmentation de la quantité d'intrants utilisés. Il s'agit notamment de la mauvaise gestion de la fertilité des sols, de l'épandage excessif d'engrais minéraux, de l'absence d'une rotation appropriée des cultures, de la salinisation des sols, du tassement des sols, de la perte de la faune et de la flore et de la mauvaise gestion de la matière organique des sols. Pour plus de détails sur ces questions, veuillez consulter le manuel de formation du COLEACP Gestion durable des sols.</p> <p>Si Dieudonné peut adopter les principes de l'agriculture de conservation, améliorer sa gestion des engrais et la fertilité des sols et appliquer les meilleures pratiques tout autour, alors ses rendements augmenteront à nouveau et l'empreinte carbone du produit sera réduite.</p>
Les émissions de GES liées à la fertilisation minérale sont élevées	<p>S2 : Revoir la gestion actuelle de la fertilisation et adopter de bonnes pratiques agricoles pour chacune des cultures cultivées.</p> <p>Dieudonné doit revoir sa gestion de la fertilisation afin de la rendre plus efficace et appropriée. Il devrait prendre en considération les meilleures pratiques, par exemple, en tenant compte du bon équilibre entre les engrais minéraux et organiques (y compris les micronutriments), de la bonne quantité d'épandage des éléments nutritifs pour répondre aux attentes de rendement et éviter la surfertilisation, et du bon moment pour les applications. Il devrait passer en revue les recommandations de meilleures pratiques qui peuvent exister localement pour ses différentes cultures, car elles peuvent avoir des besoins différents en termes de quantité de nutriments nécessaires, de ratio des différents nutriments et de besoins en micro-nutriments importants.</p> <p>Il doit établir un plan de fertilisation comprenant une fertilisation organique appropriée, et tenir compte des applications d'engrais organiques et minéraux lorsqu'il détermine la quantité d'éléments nutritifs à appliquer. Il pourrait également envisager des applications fractionnées afin d'accroître l'efficacité de la fertilisation, le cas échéant.</p> <p>Les engrais minéraux (en particulier les engrais azotés) représentent généralement un « point sensible » des émissions de GES provenant de la production végétale en raison des GES émis lors de la fabrication industrielle des engrais minéraux, de leur transport de leurs usines d'origine vers les exploitations agricoles et des émissions de GES qui proviennent des sols fertilisés après application. Si Dieudonné peut maintenir le même rendement qu'aujourd'hui ou même l'augmenter avec des apports d'engrais minéraux plus faibles, mais améliorés, les émissions de GES par unité de produit diminueront en raison de l'efficacité accrue de la fertilisation.</p> <p>S3 : Revoir le calendrier d'épandage des engrais minéraux en fonction des événements liés à l'irrigation.</p> <p>Dieudonné doit revoir ses pratiques d'irrigation et son calendrier afin de minimiser la quantité d'éléments nutritifs qu'il perd par lessivage. Cela améliorera l'efficacité de la fertilisation et pourrait lui permettre de réduire les taux d'application globaux.</p>

Les engrais organiques sont utilisés de façon inappropriée	<p>S4 : Améliorer la gestion de la matière organique en incorporant dans le sol une matière organique bien décomposée longtemps avant la culture des haricots et des tomates. Élaborer un plan de fertilisation qui tient compte à la fois des sources d'éléments nutritifs organiques et minéraux.</p> <p>L'application de la matière organique fait partie de la gestion intégrée de la fertilité des sols. Elle apporte des bénéfices en termes de rétention des nutriments, de fertilité, de structure du sol, de faune et de flore du sol. La matière organique fournit également des nutriments aux plantes en croissance.</p> <p>La gestion actuelle des apports de matière organique par Dieudonné n'est pas optimale. Il devrait appliquer de la matière organique bien décomposée et l'incorporer longtemps avant de planter des tomates et des haricots. S'il le fait, il bénéficiera plus pleinement de l'application de la matière organique et améliorera la fertilité de ses sols. Cela contribuera à rendre le système de production plus efficace, à augmenter encore les rendements et à réduire ainsi l'empreinte carbone par tonne de produit.</p>
Consommation d'énergie liée à l'irrigation et aux opérations sur le terrain	<p>S5 : Augmenter l'efficacité de l'irrigation, faire correspondre les moments d'irrigation et la quantité d'irrigation appliquée aux besoins des cultures, et envisager d'améliorer l'efficacité énergétique des pompes. Surveiller également les utilisations de l'énergie pour les opérations sur le terrain, comme le labourage ou l'épandage d'engrais, et améliorer leur rendement énergétique.</p> <p>Dieudonné doit appliquer l'irrigation en raison d'une diminution de la quantité et de la fréquence des précipitations dues au changement climatique. Comme les pompes consomment des quantités considérables d'énergie fossile, l'irrigation est liée à l'émission de GES et d'autres polluants atmosphériques, et il est important de rendre le système d'irrigation plus efficace afin d'économiser l'énergie et de réduire les émissions de GES. L'amélioration de l'efficacité est également importante pour minimiser la quantité d'eau nécessaire par unité de rendement, ce qui est particulièrement important dans les zones qui connaissent déjà un stress hydrique et une pénurie d'eau.</p> <p>Pour accroître l'efficacité de l'irrigation, il faudra peut-être améliorer l'entretien de l'équipement, mieux adapter les activités d'irrigation aux besoins des cultures (tant en ce qui concerne la quantité d'eau appliquée que le moment des activités d'irrigation), envisager l'irrigation de nuit pour réduire l'évapotranspiration ou passer à un système d'irrigation goutte à goutte. Les sources d'énergie renouvelables pour alimenter les pompes d'irrigation (p. ex., l'énergie solaire) peuvent réduire la consommation d'énergie fossile pour faire fonctionner les pompes. Une autre option possible pourrait être d'envisager des systèmes de stockage des eaux pluviales afin que l'eau n'ait pas à être pompée vers un champ plus éloigné de l'étang.</p> <p>Un autre avantage de l'amélioration de la gestion de l'irrigation est la réduction de la salinisation et les impacts positifs qui en résultent sur la fertilité des sols et les rendements. Le maintien de la couverture végétale et l'amélioration de la teneur en matière organique du sol peuvent améliorer la capacité de rétention d'eau du sol et contribuer ainsi à réduire les besoins d'irrigation.</p> <p>Les opérations sur le terrain, comme le labourage au tracteur, utilisent également de l'énergie fossile, et émettent des GES et d'autres polluants atmosphériques, comme le monoxyde de carbone ou les matières particulaires. Dieudonné devrait s'assurer qu'il utilise les machines agricoles de la façon la plus éco-énergétique possible.</p>

**Peu de
séquestration du
carbone à la ferme
dans les sols, les
arbres et les haies**

S6 : Identifier les options pour améliorer les niveaux de carbone organique du sol et réduire le risque d'érosion éolienne et hydrique.

Actuellement, l'exploitation ne fournit pas beaucoup de puits de carbone : il n'y a pas beaucoup d'arbres ou de haies, et le sol est sujet à l'érosion par le vent et l'eau. Toutefois, il est possible de retenir le carbone de l'atmosphère dans les arbres et les sols, et de contribuer ainsi aux efforts d'atténuation du changement climatique.

Les sols agricoles peuvent stocker de grandes quantités de carbone s'ils sont gérés de manière à augmenter les niveaux de matière organique du sol. On peut y parvenir en améliorant la structure du sol, en introduisant des cultures de couverture, des engrais verts ou des paillis, et en améliorant la gestion de la matière organique du sol. Dieudonné pourrait passer à un système sans préparation du sol ou avec une préparation minimale du sol et laisser des résidus de culture sur le champ pour recouvrir le sol. Cela permettrait d'économiser de l'énergie pour les opérations sur le terrain (labourage) et d'augmenter potentiellement les niveaux de carbone dans le sol.

L'utilisation excessive de pesticides peut avoir un impact négatif sur la flore et la faune du sol, ce qui peut entraîner une réduction des taux d'infiltration et une augmentation du ruissellement et donc de l'érosion.

S7 : Accroître les puits de carbone à la ferme, comme les arbres et les haies.

Dieudonné pourrait aussi planter plus de haies et d'arbres d'ombrage. Ces plantes vivaces absorbent le carbone de l'atmosphère et augmentent les stocks de carbone à la ferme, contribuant ainsi aux efforts d'atténuation des changements climatiques. L'établissement de haies et d'arbres peut également réduire l'érosion éolienne et hydrique.

D'autre part, les plantes vivaces, les systèmes agroforestiers et l'amélioration de la rotation des cultures offrent également d'autres avantages que le stockage du carbone, par exemple, la création d'habitats pour les insectes ou les oiseaux utiles qui peuvent aider à réduire l'utilisation de pesticides ou à augmenter les populations de pollinisateurs, à réduire l'érosion des sols, à fournir des nutriments par le biais des résidus des cultures ou à protéger les cultures de températures accrues et du stress thermique.

Toutes ces mesures peuvent contribuer à améliorer la productivité de l'exploitation et – toutes choses égales par ailleurs – à réduire l'empreinte carbone du produit. Le cas échéant, les arbres d'ombrage pourraient également être des espèces qui produisent un revenu supplémentaire, par exemple, des fruits ou du bois.

**Les petits
producteurs
convertissent la
végétation semi-
naturelle pour
agrandir leurs
surfaces cultivées**

S8 : Réviser le système de production des petits producteurs de manière holistique afin d'identifier les moyens d'améliorer les rendements dans la zone cultivée actuellement et éliminer la nécessité de l'étendre à la végétation semi-naturelle.

La conversion de terres semi-naturelles ou naturelles en terres agricoles libère de grandes quantités de GES parce que le carbone qui était auparavant stocké dans la végétation et les sols est perdu lors de la conversion. L'abattage ou le brûlage des forêts est très préoccupant à cet égard, mais il est tout aussi important de protéger les prairies, les friches arbustives ou les zones humides de la conversion. La prévention d'un tel changement d'affectation des terres peut contribuer de manière significative aux efforts d'atténuation du changement climatique.

Dans ce cas, il devrait être possible d'empêcher l'expansion de la superficie cultivée par les petits producteurs sans conséquences négatives pour ces derniers. En réexaminant et en améliorant leurs pratiques de gestion, par exemple, l'utilisation excessive et inappropriée d'engrais minéraux, et la mauvaise gestion de la fertilité des sols, il devrait être possible d'augmenter de nouveau les rendements sur leur zone de production existante. Dieudonné devrait collaborer avec ses petits producteurs pour les aider à améliorer leurs pratiques afin que les produits qu'il leur achète aient une empreinte carbone moindre. Il devrait cesser de les encourager à augmenter leur production en agrandissant leur zone de production.

Le système de production des petits producteurs libère de grandes quantités de GES

S9 : Revoir le système de production des petits producteurs, en particulier leur gestion de la fertilisation, et les aider à adopter les meilleures pratiques de gestion.

Les petits producteurs ont accru leur utilisation d'intrants externes, en particulier d'engrais minéraux et de pesticides, afin de contrecarrer la baisse observée des rendements. Toutefois, les niveaux de rendement ne se sont pas améliorés et il est nécessaire d'en identifier les raisons. Un plan de gestion de la fertilisation devrait être élaboré afin d'éliminer les sur-applications et d'accroître l'efficacité des apports d'éléments nutritifs. Une meilleure fertilisation peut augmenter les rendements et améliorer la qualité des produits et maintenir ou augmenter les rendements actuels avec des taux d'épandage d'engrais plus faibles.

La gestion de la fertilisation peut être améliorée en tenant compte des besoins spécifiques des cultures en éléments nutritifs et en déterminant le taux et le rapport optimaux d'épandage des macro- et micro-nutriments ainsi que le meilleur moment pour l'application pendant le cycle de culture. Les matières organiques devraient également être considérées parce qu'elles contiennent des éléments nutritifs et aident à améliorer la fertilité du sol.

Émissions de GES relativement élevées dues à la logistique

S10 : Identifier les options pour améliorer la logistique du transport des produits frais des petits producteurs vers la ferme de Dieudonné et le port d'exportation.

L'optimisation de la logistique du transport peut réduire la consommation de combustibles fossiles et donc les émissions de GES. Les possibilités d'amélioration comprennent : une planification optimale des itinéraires pour que le plus grand nombre possible de produits soient ramassés auprès des petits producteurs au cours d'un seul voyage (au lieu d'effectuer plusieurs voyages) ; un entretien adéquat des véhicules et des techniques de conduite économes en carburant ; le partage des véhicules avec d'autres agriculteurs ou entreprises afin de réduire le nombre de voyages à vide et la planification du calendrier des voyages afin de réduire leur nombre total (c.-à-d. lorsque la quantité maximale des produits peut être ramassée en un voyage).

Si les petits producteurs livrent leurs produits à Dieudonné au lieu que ce soit lui qui les collecte, alors ils doivent se coordonner pour s'assurer de livrer les fruits et légumes de plusieurs producteurs en un seul voyage. L'information sur les marchés est nécessaire pour planifier le moment de la récolte et la logistique subséquente afin que les produits arrivent sur les marchés au moment optimal.

Pertes importantes de fruits et légumes frais pendant le transport et le stockage

S11 : Examiner les causes des meurtrissures, de la détérioration et de la perte de qualité pendant le transport et le stockage, identifier les options d'amélioration et former le personnel en conséquence. Envisager d'investir dans des installations d'entreposage frigorifique.

Les pertes après récolte représentent un gaspillage de ressources, et toutes les émissions de GES et les ressources utilisées au cours de leur culture auront été produites en vain. La réduction des pertes après récolte contribue donc à réduire l'empreinte carbone et environnementale des produits qui atteignent d'autres étapes de la chaîne d'approvisionnement et, finalement, le consommateur. Les options pour réduire les pertes après récolte comprennent :

- une meilleure planification de la logistique du transport pour réduire les temps de transit ;
- des matériaux d'emballage améliorés qui protègent les fruits et légumes frais des meurtrissures, de la perte d'humidité, des agents pathogènes ou des températures élevées ;
- éviter les manipulations brusques pendant le transport et dans les entrepôts et les unités de stockage ;
- disposer d'entrepôts frigorifiques ;
- la formation de l'ensemble du personnel concerné afin de le sensibiliser à cette question ;

L'emballage et la transformation libèrent des gaz à effet de serre	<p>S12 : Augmenter l'efficacité énergétique de la station de conditionnement et de tri. Comprendre quels processus consomment le plus d'énergie fossile et commencer par ceux-ci. Envisager des options pour passer à des sources d'énergie renouvelables. Identifier les sources de matériaux d'emballage à faible teneur en carbone.</p> <p>La première étape pour améliorer la gestion de l'énergie de la station de conditionnement et de tri consiste à comprendre quels sont les processus qui consomment le plus d'énergie. En vous concentrant d'abord sur ces principaux procédés, essayez de comprendre si l'équipement utilisé est efficace sur le plan énergétique. Si ce n'est pas le cas, envisagez des options d'amélioration, par exemple, l'amélioration de l'efficacité énergétique de l'équipement, l'amélioration de l'entretien et de la manutention. Envisagez de passer, si possible, à des sources d'énergie renouvelables, comme l'énergie éolienne ou solaire.</p> <p>Les matériaux d'emballage ont une empreinte carbone liée à leur production et à leur transport du lieu de fabrication à l'exploitation. Demandez à votre fournisseur des informations sur l'empreinte carbone de ses produits pour l'encourager à mettre en œuvre des réductions. Envisagez de passer à des matériaux de remplacement en tenant compte de l'impact potentiel sur le poids total lors du transport des produits vers ses marchés et de la question de savoir si le nouvel emballage offre au moins le même degré de protection des produits contre la détérioration, les meurtrissures et la perte de qualité.</p>
D'importantes pertes de carbone résultent de l'utilisation de la tourbe pour corriger le pH du sol.	<p>S13 : Ne pas utiliser de tourbe pour corriger le pH du sol. Identifier d'autres options pour améliorer la structure du sol et corriger le pH.</p> <p>Il n'est pas recommandé d'utiliser de la tourbe pour essayer de corriger le pH actuellement trop élevé du sol. Le drainage des tourbières, l'extraction et l'application subséquente de la tourbe en agriculture entraînent d'importantes émissions de GES parce que la tourbe contient beaucoup de carbone. Ce carbone est perdu dans l'atmosphère lorsque les tourbières sont drainées et que la tourbe se décompose.</p> <p>La protection des habitats qui contiennent des stocks élevés de carbone (p. ex., les zones humides, les tourbières) est une contribution très importante à la protection de notre climat. Il est également nécessaire de protéger leur vie végétale et animale.</p> <p>Dieudonné devrait envisager des alternatives appropriées qui sont plus efficaces pour améliorer le pH du sol et qui ne menacent pas les habitats naturels importants.</p>
La surutilisation des pesticides entraîne la pollution de l'atmosphère, des sols et des plans d'eau.	<p>S14 : Introduire la lutte intégrée contre les ravageurs pour réduire l'utilisation des pesticides et trouver des solutions de rechange ayant un impact environnemental moindre.</p> <p>Les pesticides peuvent aggraver la pollution de l'air, par exemple, par dérive pendant la pulvérisation aérienne, par volatilisation des cultures et des sols, ou par érosion éolienne des sols. Elles affectent également la biodiversité et la vie du sol de manière négative, peuvent pénétrer dans les plans d'eau et polluer les eaux utilisées pour l'irrigation.</p> <p>Dieudonné devrait réduire la quantité de pesticides appliquée et respecter les doses recommandées. Il devrait appliquer les principes de l'agriculture intégrée, réintroduire davantage de cultures dans ses rotations et mélanger différentes variétés de cultures. Il devrait également envisager des solutions de rechange possibles à l'utilisation des pesticides, par exemple, l'enlèvement des insectes à la main, l'utilisation de pièges, l'élimination des sites de reproduction des ravageurs, l'utilisation d'espèces végétales indigènes plus résistantes aux ravageurs locaux et l'utilisation de moyens de contrôle biologiques (p. ex., variétés végétales résistantes ou assurant la santé des populations de prédateurs naturels, comme les oiseaux). Un sol sain peut aussi aider en rendant les cultures plus résistantes.</p> <p>La lutte intégrée contre les ravageurs vise à réduire l'utilisation des pesticides chimiques en utilisant d'abord de telles solutions de rechange, et les pesticides seulement lorsque ces solutions sont inefficaces. L'application au sol permet de réduire la dérive des pesticides par rapport à l'épandage aérien. Dieudonné devrait introduire des zones tampons, par exemple des arbres, qui peuvent servir de brise-vent, qui peuvent filtrer les gouttes de pesticides et empêcher ainsi la dérive vers d'autres zones.</p>

Corrigé proposé : analyse des solutions

Solutions proposées		Efficace	Rentable	Accessible	Durable	Score total
S1 :	Revoir les pratiques de gestion actuelles afin d'identifier toutes les raisons qui contribuent à une baisse des rendements et adopter les meilleures pratiques de gestion pour améliorer les rendements sans augmenter l'utilisation des intrants ou même les diminuer le cas échéant.	4	4	3	4	15
S2 :	Revoir la gestion actuelle de la fertilisation minérale et adopter de bonnes pratiques agricoles pour chacune des cultures cultivées.	4	4	3	3	14
S3 :	Revoir le calendrier d'épandage des engrais minéraux en fonction des événements liés à l'irrigation.	2	2	4	3	11
S4 :	Améliorer la gestion de la matière organique en incorporant de la matière organique bien décomposée dans le sol longtemps avant la culture des haricots et des tomates. Élaborer un plan de fertilisation qui tient compte à la fois des sources d'éléments nutritifs organiques et minéraux.	4	3	2	4	13
S5 :	Augmenter l'efficacité de l'irrigation, faire correspondre les événements d'irrigation et la quantité d'irrigation appliquée aux besoins des cultures, et envisager d'améliorer l'efficacité énergétique de l'utilisation des pompes. Surveiller également l'utilisation de l'énergie pour les opérations sur le terrain, comme le labourage, et améliorer leur efficacité énergétique.	3	3	2	4	12
S6 :	Identifier les options pour améliorer les niveaux de carbone organique du sol et réduire le risque d'érosion par le vent et l'eau.	3	3	2	4	12
S7 :	Accroître les puits de carbone à la ferme, comme les arbres et les haies.	3	2	2	4	11

S8 :	Revoir le système de production des petits producteurs d'une manière holistique afin d'identifier les moyens d'améliorer les rendements de la zone existante et d'éliminer la nécessité de l'étendre à la végétation semi-naturelle.	4	4	3	4	15
S9 :	Revoir le système de production des petits producteurs, en particulier leur gestion de la fertilisation, et les aider à adopter les meilleures pratiques de gestion.	4	4	3	4	15
S10 :	Identifier les options pour améliorer la logistique du transport des produits frais des petits producteurs vers la ferme de Dieudonné et vers le port d'exportation.	2	3	3	3	11
S11 :	Examiner les causes des meurtrissures, de la détérioration et de la perte de qualité pendant le transport et le stockage, identifier les options d'amélioration et former le personnel en conséquence. Envisager d'investir dans des installations d'entreposage frigorifique.	3	3	2	3	11
S12 :	Augmenter l'efficacité énergétique de la station d'emballage et de tri. Comprendre quels processus consomment le plus d'énergie fossile et commencer par ceux-ci. Envisager des options pour passer à des sources d'énergie renouvelables. Identifier les sources de matériaux d'emballage à faible teneur en carbone.	2	2	2	3	9
S13 :	Ne pas utiliser de tourbe pour corriger le pH du sol. Identifier d'autres options pour améliorer le pH du sol.	2	2	2	4	10
S14 :	Introduire la lutte intégrée contre les ravageurs pour réduire l'utilisation des pesticides et trouver des solutions de rechange ayant un impact environnemental moindre.	2	2	2	4	10

(1 : faible ; 2 : moyen ; 3 : bon ; 4 : excellent)

Sur base des scores, 4 groupes de priorités se détachent :

- Priorité 1 : S1 - S4 - S5 - S10 - S11 - S12 (scores de 13 à 15)
- Priorité 2 : S2 - S8 - S9 - S13 - S16 (scores de 12)
- Priorité 3 : S3 - S14 - S15 (scores de 10 à 11)
- Priorité 4 : S6 - S7 (scores de 9)

Mon analyse complémentaire (tableaux libres à remplir) : autres problèmes identifiés et/ou autres solutions proposées

Problèmes identifiés (constat, observation)	Proposition(s) de solution(s) (ajoutez quelques explications)
.....	S... :
.....	S... : S... :
.....	S... : S... :
.....	S... : S... :

Autres solutions proposées		Efficace	Rentable	Accessible	Durable	Score
S... :						
S... :						
S... :						
S... :						

(1 : faible ; 2 : moyen ; 3 : bon ; 4 : excellent)

Classer l'ensemble de vos « solutions » sur base d'un score vous permet d'identifier les actions qui seraient prioritairement à mettre en œuvre, mais le plus important pour la suite est d'avoir une cohérence et une logique dans les interventions. Certaines étapes doivent précéder les autres.

5. PARTIE 4 : PLAN D'ACTION PROPOSÉ

5.1. Consignes pour la présentation d'un plan d'action

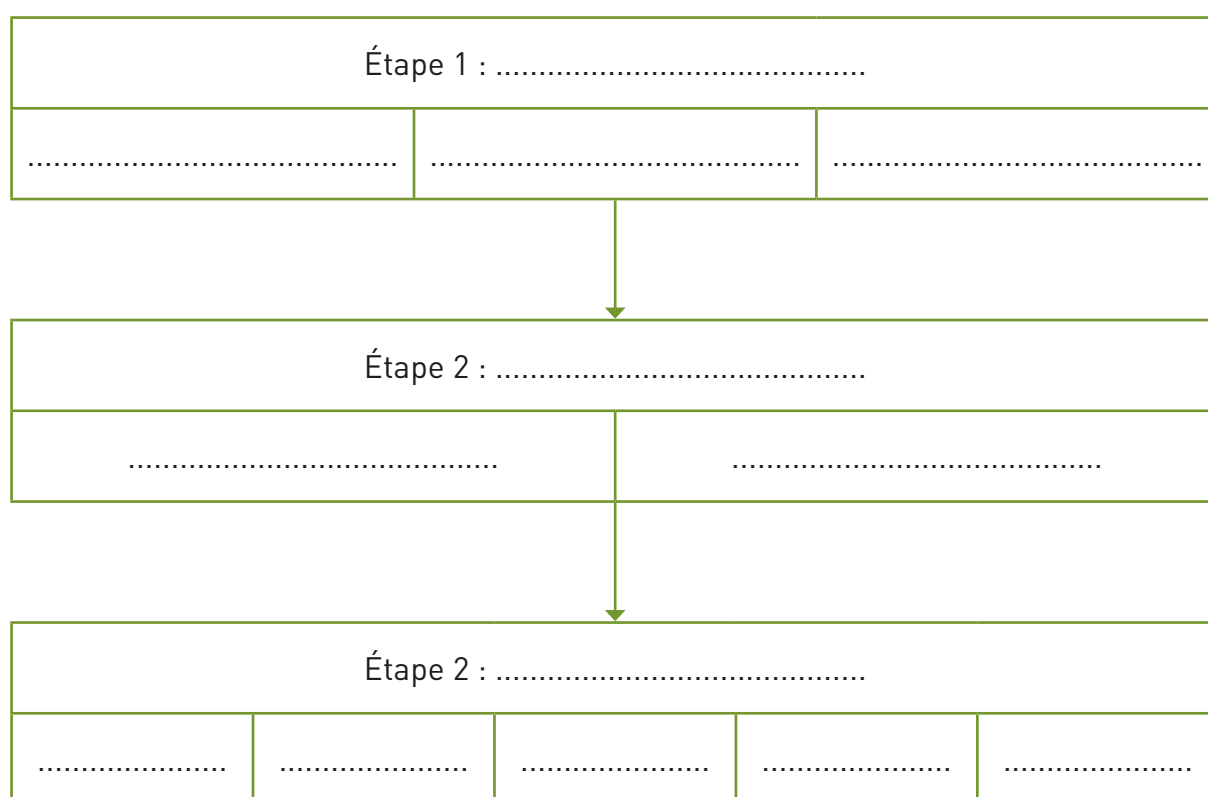
Consigne

Pour aider Dieudonné, il faut lui proposer un « plan d'action » afin de mettre en œuvre les solutions, en commençant par celles qui sont considérées comme prioritaires. Travaillez avec un schéma (comme l'exemple) pour indiquer la logique de mise en œuvre des interventions.



Schéma du plan d'actions (exemple de schéma à utiliser)

Indiquer dans le schéma les N étapes à suivre (description générale de l'objectif) et les N actions à mener dans chaque étape (sur base des solutions considérées comme prioritaires). Dans cet exemple de schéma, on a retenu 4 étapes :



Faites votre propre schéma et proposez un « plan d'action » complet. Consultez ensuite le corrigé proposé et comparez avec votre schéma.

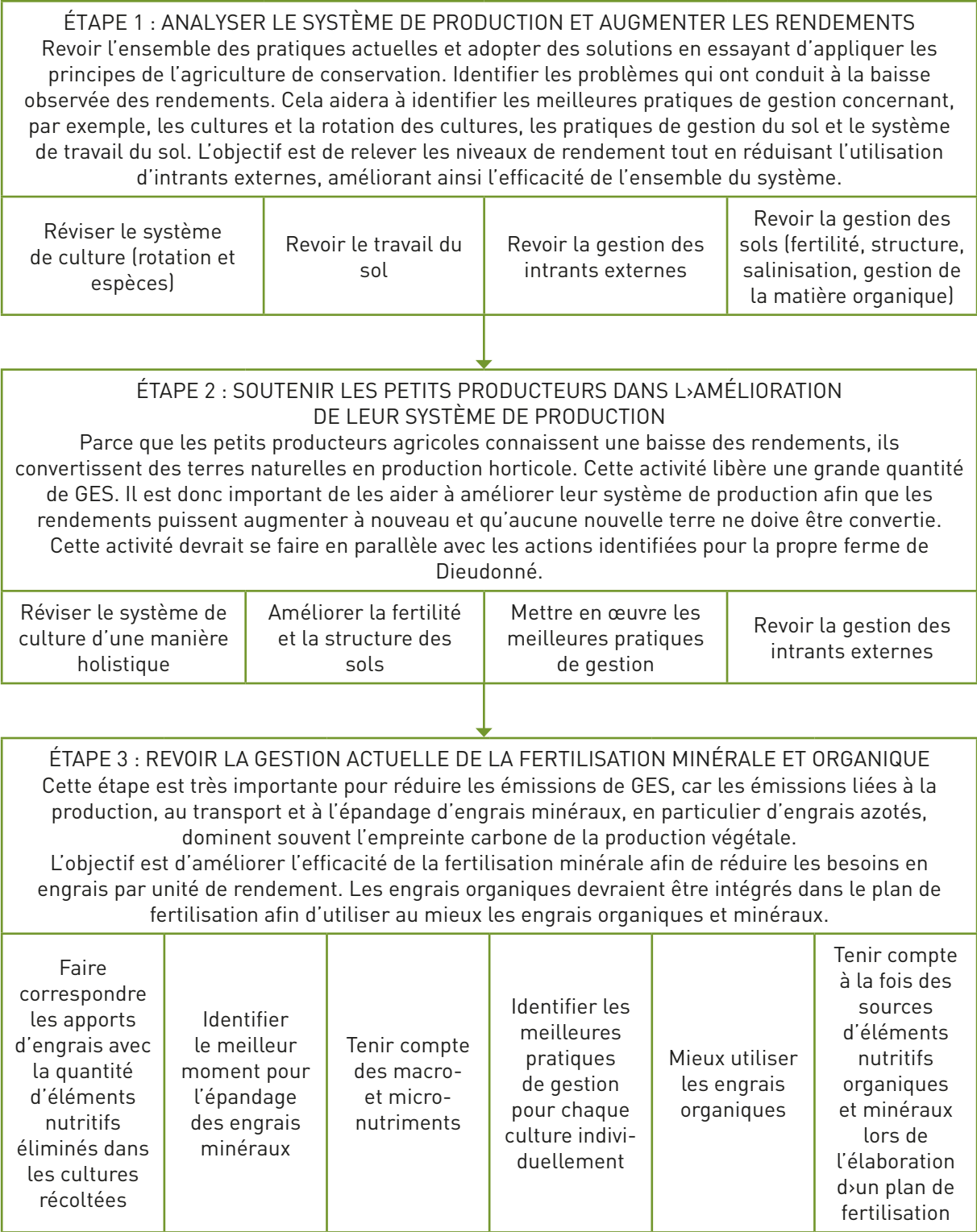
5.2. Élaboration d'un plan d'action : résultat proposé

Vous avez réalisé votre partie de l'exercice ? Bravo ! Comparez maintenant votre résultat au corrigé proposé, identifiez les différences et essayez de voir pourquoi votre résultat diffère de ce schéma. Mais peut-être avez-vous imaginé une nouvelle et/ou une meilleure proposition ? Rédigez en quelques lignes votre analyse des résultats et votre perception personnelle : cela vous aidera à retracer la logique de votre démarche.

Corrigé proposé : propositions de solutions

Le « plan d’actions » doit se construire en tenant compte des priorités retenues, mais agir sur un élément pour obtenir un effet peut en même temps améliorer un autre problème. Ainsi, si on se base sur les priorités du corrigé proposé :

- Priorité 1 : S1 - S4 - S5 - S10 - S11 - S12 (scores de 13 à 15)
- Priorité 2 : S2 - S8 - S9 - S13 - S16 (scores de 12)
- Priorité 3 : S3 - S14 - S15 (scores de 10 à 11)
- Priorité 4 : S6 - S7 (scores de 9)



ÉTAPE 4 : EXAMINER LES UTILISATIONS DE L'ÉNERGIE LIÉES AUX OPÉRATIONS CULTURALES ET À LA GESTION DE L'IRRIGATION

Cela améliorera l'efficacité de l'utilisation de l'énergie, et réduira ainsi les émissions de GES et d'autres polluants atmosphériques en réduisant la quantité totale d'énergie consommée. Identifiez tous les processus qui utilisent de l'énergie et améliorez l'efficacité de ces processus. Commencez par le système d'irrigation en raison de sa grande consommation d'énergie.

Augmenter l'efficacité du système d'irrigation	Améliorer la capacité de rétention d'eau du sol afin de réduire les besoins d'irrigation	Utiliser de l'énergie renouvelable dans la mesure du possible	Mieux adapter les événements d'irrigation aux besoins des plantes pour économiser de l'eau et de l'énergie
--	--	---	--

ÉTAPE 5 : AUGMENTER LES STOCKS DE CARBONE DU SOL ET PLANTER DES ARBRES ET DES HAIES

L'amélioration de la teneur en matière organique du sol n'est pas seulement bonne pour la fertilité du sol. En réduisant son érosion et en améliorant sa capacité de rétention d'eau, elle contribue également à atténuer les changements climatiques en retenant le carbone de l'atmosphère. Les arbres et les haies bloquent également le carbone et peuvent fournir de l'ombre, des habitats pour les pollinisateurs et même des produits supplémentaires.

Améliorer la gestion des sols pour augmenter les stocks de carbone dans le sol	Ajouter de la matière organique bien décomposée	Établir des cultures de couverture et envisager un travail du sol nul ou minimal	Rétablir les arbres et les haies
--	---	--	----------------------------------

ÉTAPE 6 : AMÉLIORER LA GESTION DU TRANSPORT, DE LA TRANSFORMATION ET DU CONDITIONNEMENT DES PRODUITS FRAIS

L'amélioration de la logistique réduira la consommation d'énergie pour le transport routier des fruits et légumes frais, ce qui entraînera une réduction des émissions de GES et d'autres polluants atmosphériques.

Optimiser la planification d'itinéraires	Former les conducteurs aux techniques de conduite économes en énergie	Entretien correctement les véhicules	Augmenter l'efficacité énergétique de la station d'emballage et de triage
--	---	--------------------------------------	---

ÉTAPE 7 : RÉDUIRE LA QUANTITÉ DE PRODUITS PERDUS À CAUSE DE LA DÉTÉRIORATION

L'amélioration de la gestion post-récolte réduit la quantité de produits frais perdus en raison de la détérioration et augmente la part des produits de haute qualité. La réduction des pertes après récolte réduit les émissions de GES parce que les produits perdus représentent un gaspillage des ressources et des émissions pendant leur production.

Planifier la logistique pour réduire les temps de transit	Utiliser des matériaux d'emballage améliorés	Éviter les manipulations brusques	Entrepôt frigorifique de produits facilement périssables
---	--	-----------------------------------	--

ÉTAPE 8 : ARRÊTER D'UTILISER LA TOURBE POUR CORRIGER LE pH DU SOL ET RÉDUIRE L'UTILISATION DES PESTICIDES

L'utilisation de la tourbe libère de grandes quantités de carbone. Elle a également des impacts négatifs sur les habitats naturels importants où la tourbe est extraite. Il existe d'autres options pour améliorer le pH du sol, qu'il convient d'utiliser à la place.
La lutte intégrée contre les ravageurs aide à réduire la quantité de pesticides utilisés pour protéger l'air, le sol et les plans d'eau.

Identifier les alternatives appropriées pour corriger le pH du sol	Appliquer de la matière organique bien décomposée pour améliorer la structure du sol et améliorer le pH.	Adopter des pratiques de lutte intégrée contre les ravageurs et réduire l'utilisation des pesticides
--	--	--

Mon analyse complémentaire (espace libre) :

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



Abréviations et acronymes les plus utilisés

ABRÉVIATIONS ET ACRONYMES LES PLUS UTILISÉS

AASQA	Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air
AEE	Agence européenne de l'environnement
AVC	Accident vasculaire cérébral
CE	Commission européenne
CEE-NU	Commission économique pour l'Europe des Nations Unies
CLA	Couche limite atmosphérique
CNES	Centre national d'études spatiales
COV	Composés organiques volatils
EPA	Environmental Protection Agency (en français : Agence de protection de l'environnement)
FPD	Flame Photometric Detector (en français : Détecteur à photométrie de flamme)
GES	Gaz à effet de serre
Gt	Gigatonnes
IASI	Interféromètre atmosphérique de sondage infrarouge
IPPC	Integrated Pollution Prevention and Control (en français : Prévention et réduction intégrée de la pollution)
KH	Constante de Henry
MTD	Meilleures techniques disponibles
NPD	Nitrogen Phosphorus Detector (en français : Détecteur à photométrie)
OMS	Organisation mondiale de la santé
ONU	Organisation des Nations Unies
P	Pression de vapeur
PM_x	Particulate Matter < x µm (en français : Particule fine)
PM_{2.5}	Particulate Matter < 2.5 µm (en français : Particule fine < 2.5 µm)
PM₁₀	Particulate Matter < 10 µm (en français : Particule fine < 10 µm)
POP	Polluant organique persistant
ppb	Partie par milliard
ppt	Partie par trillion
PRG	Pouvoir de réchauffement global
S	Solubilité
TSP	Total Suspended Particulates (en français, Total des particules en suspension)
UV	Ultraviolet
VLE	Valeurs limites d'émissions
VLIEP	Valeurs limites indicatives d'exposition professionnelle



Références bibliographiques

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AGO, E.E., *Dynamique des flux de carbone entre l'atmosphère et des écosystèmes ouest-africains : cas des forêts et savanes sous climat soudanien au Bénin*, Thèse de doctorat, Université de Liège – Gembloux Agro Bio Tech, 2016.

AKPO, S., *Contribution des pratiques de gestion intégrée des nutriments à l'émission du dioxyde de carbone sous culture maraîchère au Nord Bénin : Cas de l'amarante (Amaranthus cruentus L.)*, Mémoire de Master, Faculté d'agronomie, Département d'aménagement et de gestion des ressources naturelles, Université de Parakou, Bénin, 2017.

ANHEIM, S., « Exploration méthodologique pour pesticides atmosphériques », *Environnement Magazine*, n° 1611, 2002, pp. 88-90.

ARROUAYS *et al.*, *Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Expertise scientifique collective*, rapport d'étude, INRA, 2002, p. 133.

ASCHAN-LEYGONIE C. *et al.*, « Comment évaluer l'exposition aux pesticides de l'air en population générale ? Enseignements d'une revue bibliographique », *Cybergeog : European Journal of Geography*, Environnement, Nature, Paysage, doc. 729, mis en ligne le 11 juin 2015, cybergeog.revues.org/27056, consulté le 20 novembre 2016.

BANWART, S.A., BLACK, H., CAI, Z., GICHERU, P.T., JOOSTEN, H., VICTORIA, R.L., MILNE, E., NOELLEMEYER, E. et PASCUAL, U., « The global challenge for soil carbon », in Banwart, S.A., Noellemeyer, E. et Milne, E. (éds), *Soil carbon: science, management and policy for multiple benefits*, CABI, 2015.

BARBER, A. ET PELLOW, G., « Energy use and efficiency measures for the New Zealand arable and outdoor vegetable industry », préparé pour l'Office des changements climatiques et l'Office de l'efficacité et de la conservation énergétiques, AgriLINK New Zealand Ltd., 2005.

BASSET-MENS, C., VANNIÈRE, H., GRASSELLY, D., HEITZ, H., BRAUN, A., PAYEN, S., KOCH, P. ET BIARD, Y., « Environmental impacts of imported and locally grown fruits for the French market: a cradle-to-farm-gate LCA study », *Fruits*, n° 71, 2016, pp. 93-104.

BIRDSEY, R., PAN, Y. ET HOUGHTON, R., « Sustainable landscapes in a world of change: tropical forests, land use and implementation of REDD+: part I », *Carbon Management*, n° 4, 2013, pp. 465-468.

BIRKENBERG, A. ET BIRNER, R., « The world's first carbon neutral coffee: lessons on certification and innovation from a pioneer case in Costa Rica », *J. Cleaner Production*, n° 189, 2018, pp. 485-501.

BOCHU, J.-L., MÉTAYER, N., BORDET, C. ET GIMARET, M., « Development of carbon calculator to promote low carbon farming practices – Methodological guidelines (methods and formula) », livrable à EC-JRC-IES by Solagro, 2013.

BRIAND, O. *et al.*, « Étude expérimentale des transferts sol-air de pesticides à l'échelle d'une parcelle. Utilité de déterminer des flux de volatilisation », *Ingénieries*, n° sp. Phytosanitaires, 2001, pp. 3-7.

BUYSSE, P. *et al.*, « Carbon budget measurement over 12 years at a crop production site in the silty-loam region in Belgium », *Agric For Meteorol*, 2017, p.246.

CCNUCC, « Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques », document FCCC/INFORMAL/84, 1992, unfccc.int/resource/docs/convkp/convfr.pdf, consulté le 7 septembre 2019.

CCNUCC, *Rapport de synthèse de la COP19*, 2013.

DE SCHUTTER, D., *Agroecology and the right to food*, rapport présenté à la 16^e session du Conseil des droits de l'homme des Nations Unies (A/HRC/16/49), 2010, consulté en août 2019.

DIMASSI *et al.*, « Long-term effect of contrasted tillage and crop management on soil carbon dynamics during 41 years », *Agric. Ecosyst. Environ.*, n° 188, 2014, pp. 134-146.

DJABY, B. ET OZER, P., « Évaluation des émissions de méthane imputables au secteur agricole en Afrique de l'ouest (1961-2050) », Papier de conférence, XXVIE COLLOQUE DE L'ASSOCIATION INTERNATIONALE DE CLIMATOLOGIE, 2013.

DOMMAIN, R., BARTHELMES, A., TANNEBERGER, F., BONN, A., BAIN, C. ET JOOSTEN, H., « Country-wide overview of opportunities », in Singh, H.C.P., Rao, N.K.S. et Shivashankara, K.S. (éds), *Climate-resilient horticulture: adaptation and mitigation strategies*, New Delhi, Springer India, 2013.

DOSSOU-YOVO, E.R. *et al.*, « Reducing soil CO₂ emission and improving upland rice yield with no-tillage, straw mulch and nitrogen fertilization in northern Benin », *Soil Tillage Res.*, n° 156, 2016, pp. 44-53.

EDWARDS-JONES, G., MILÀ, I., CANALS, L., HOUNSOME, N., TRUNINGER, M., KOERBER, G., HOUNSOME, B., CROSS, P., YORK, E.H., HOSPIDO, A., PLASSMANN, K., HARRIS, I.M., EDWARDS, R.T., DAY, G.A.S., TOMOS, A.D., COWELL, S.J. et JONES, D.L., « Testing the assertion that 'local food is best': the challenges of an evidence based approach », *Trends in Food Science and Technology*, n° 19, 2008, pp. 265-274.

FAO, « Unlocking the potential of soil organic carbon », Outcome doc. of the Global Symposium on Soil Organic Carbon, 21-23 March 2017, Rome, FAO, 2017.

FAO, *Pratiques et technologie pour une Agriculture Intelligente face au Climat (AIC) au Bénin*, Rome, FAO, 2017.

Fédération ATMO, « Contamination de l'air par les pesticides : nouvelle composante de la pollution de l'air. Bilan des mesures réalisées par les AASQA », www.observatoire-

pesticides.gouv.fr/upload/bibliotheque/735640767039620352890835767325/LCSQA_nouvelle_composante_pollution_air_2006.pdf.

FONTAINE, S., MARIOTTI, A. ET ABBADIE, L., « The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? », *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 35, n° 6, 2003, pp. 837-843.

FRANZE, J. ET CIROTH, A., « A comparison of cut roses from Ecuador and The Netherlands », *Int'l J. Life Cycle Ass.*, n°16, 2011, pp. 366-379.

GARNETT, T., « Where are the best opportunities for reducing greenhouse gas emissions in the food system (including the food chain)? », *Food Pol.*, n° 36, 2011, pp. 23-32.

GIEC, « Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux des gaz à effet de serre », in EGGLESTON, H.S., BUENDIA, L., MIWA, K., NGARA, T. et TANABE, K. (éds), pour le Programme pour les inventaires nationaux des gaz à effet de serre, Rapport méthodologique IGES, 2006.

GIEC, « Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change », STOCKER, T.F., QIN, D., PLATTNER, G.K., TIGOR, M., ALLEN, S.K., BOSCHUNG, J., NAUELS, A., XIA, Y., BEX, V. et MIDGLEY, P.M. (éds), New York, CUP, 2013, p. 1535.

GOULDING, K., « Nitrate leaching from arable and horticultural land », *Soil Use and Management*, n° 16, 2000, pp. 145-151.

HARVEY, C.A., CHACÓN, M., DONATTI, C.I., GAREN, E., HANNAH, L., ANDRADE, A., BEDE, L., BROWN, D., CALLE, A., CHARÁ, J., CLÉMENT, C., GRAY, E., HOANG, M.H., MINANG, P., RODRÍGUEZ, A.M., SEEBERG-ELVERFELDT, C., SEMROC, B., SHAMES, S., SMUKLER, S., SOMARRIBA, E., TORQUEBAU, E., VAN ETEN, J. et WOLLENBERG, E., « Climate-smart landscapes: opportunities and challenges for integrating adaptation and mitigation in tropical agriculture », *Conservation Letters*, n° 7, 2014, pp. 77-90.

HLPE, « Food losses and waste in the context of sustainable food systems. A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security », Rome, 2014, www.un.org/en/zero hunger/pdfs/HLPE_FLW_Report-8_EN.pdf.

HOSONUMA, N., HEROLD, M., DE SY, V., DE FRIES, R.S., BROCKHAUS, M., VERCHOT, L., ANGELSEN, A. et ROMIJN, E., An assessment of deforestation and forest degradation drivers in developing countries. *Environmental Research Letters* 7, 2012, 044009.

HOUGHTON, R. W., « The relationship of SST to thermocline depth at annual and interannual time scales in the tropical Atlantic Ocean », *J. Geophys. Res.*, n° 96, 1991, pp. 15173-15186.

HOUZE, E., « Mesure des pesticides dans l'air ambiant en milieu urbain », Air Breizh, Université de Pau et des Pays de l'Adour, www.observatoire-pesticides.gouv.fr/upload/

bibliotheque/047478390742040381825199248304/Air_Breizh_Bretagne_Urbain_2003.pdf, www.srfood.org/images/stories/pdf/officialreports/20110308_a-hrc-16-49_agroecology_en.pdf.

HYAMS, K. ET FAWCETT, T., « The ethics of carbon offsetting », *WIREs Climate Change*, n° 4, 2013, pp. 91-98, onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wcc.207.

INGWERSEN, W.W., « Life cycle assessment of fresh pineapple from Costa Rica », *J. Cleaner Production*, n° 35, 2012, pp. 152-163.

IPCC, « 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories », in Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. et Tanabe, K. (éds), National Greenhouse Gas Inventories Programme, IGES, 2006.

IPCC, « IPCC Special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems », Résumé à l'intention des décideurs, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2019, www.ipcc.ch/report/srccl.

IRIARTE, A., ALMEIDA, M.G. ET VILLALOBOS, P., « Carbon footprint of premium quality export bananas: case study in Ecuador, the world's largest exporter », *Science of the Total Environment*, n° 472, 2014, pp. 1082-1088.

KIKULWE, E.M., OKURUT, S., AJAMBO, S., NOWAKUNDA, K., STOIAN, D. ET NAZIRI, D., « Postharvest losses and their determinants: a challenge to creating a sustainable cooking banana value chain in Uganda », *Sustainability*, n°10, 2018, p. 2381, doi: 10.3390/su10072381.

KOCH, D., LU, C. *et al.*, « Temporal association of children's pesticide exposure and agricultural spraying: report of a longitudinal biological monitoring study », *Environmental health perspectives*, vol. 110, 2002, pp. 829-833.

KÖPPEN, W., « Classification of climates according to temperature, precipitation and seasonal cycle », *Petermanns Geogr. Mitt.*, n° 64, 1918, pp. 193-203, 243-248.

KOTTEK, M., GRIESER, J., BECK, C., RUDOLF, B. ET RUBEL, F., « World map of the Köppen-Geiger climate classification updated », *Meteorol. Zeitschr.*, n° 15(3), 2006, pp. 259-263.

KUMAR, S.N., « Modelling climate change impacts, adaptation strategies and mitigation potential in horticultural crops », in Singh, H.C.P., Rao, N.K. et Shivashankar, K.S. (éds.), *Climate-resilient horticulture: adaptation and mitigation strategies*, New Delhi, Springer India, 2013.

LABREUCHE, J., LE SOUDER, C., *et al.*, *Évaluation des Impacts environnementaux des Techniques Culturelles Sans Labour (TCSL)*, Rapport final, 2007.

- LAL, R., « Sequestering carbon in soils of agro-ecosystems », *Food Pol'y*, n° 36, 2011, pp. S33-S39.
- LAL, R., « Soil carbon management and climate change », *Carbon Man't*, n° 4, 2013, pp. 439-462.
- LANDRIEU, G., « Les impacts des énergies fossiles sur l'environnement », n° 5, Entretiens de la Villette, « L'énergie: un concept des usages des enjeux », Paris, mars 1994.
- LE QUÉRÉ, C. *et al.*, « Global Carbon Budget 2018 », *Earth Syst. Sci. Data*, n° 10, 2018, pp. 2141-2194.
- LEBEAU, F. *et al.*, « RT Drift : Modèle permettant d'évaluer en temps réel les risques environnementaux liés à la dérive des produits phytosanitaires », 2011, slideplayer.fr/slide/3189204/.
- LEHUGER, S., « Predicting the global warming potential of agro-ecosystems », *Biogéosciences*, n° 4, 2006, pp. 1059-1092.
- LIPINSKI, B. *et al.*, « Reducing Food Loss and Waste. Working Paper, Installment 2 of Creating a Sustainable Food Future », Washington D.C., World Resources Institute, 2013, pdf.wri.org/reducing_food_loss_and_waste.pdf.
- LUSKE, B., « Comprehensive carbon footprint assessment of Dole bananas », 2010, dolecrs.com/uploads/2012/06/Soil-More-Carbon-Footprint-Assessment.pdf (consulté en août 2019).
- MARLIÈRE, F., *Pesticides dans l'air ambiant*, Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air, INERIS, 2001, pp. 1-56.
- MCCARTHY, D. S. *et al.*, « Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Different Land-Use Systems: A Case Study of CO₂ in the Southern Zone of Ghana », *Applied and Environmental Soil Science*, 2018, pp. 1-12.
- MÉLIÈRES, M.-A. et MARÉCHAL, C., *Climats, Passé, présent, futur*, Paris, Belin, 2015.
- MILÀ, I., CANALS, L., BURNIP, G.M. et COWELL, S.J., « Evaluation of the environmental impacts of apple production using life cycle assessment (LCA): case study in New Zealand », *Agriculture, Ecosystems and Environment*, n° 114, 2006, pp. 226-238.
- MILÀ, I., CANALS, L., COWELL, S.J., SIM, S. et BASSON, L., « Comparing local versus imported apples: a focus on energy use », *Environ. Sci. & Poll. Res'ch*, n° 14, 2007, pp. 276-282.
- MILÀ, I., CANALS, L., MUNOZ, I., HOSPIDO, A., MCLAREN, S. et PLASSMANN, K., *Life cycle assessment (LCA) of domestic vs. imported vegetables. Case studies on broccoli, salad crops and green beans*, Centre for Environmental Strategy, Université de Surrey, 2008.

MOOMAW, W., YAMBA, F., KAMIMOTO, M., MAURICE, L., NYBOER, J., URAMA, K. et WEIR, T., « Introduction », in IPCC: *Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlomer, S. et von Stechow, C. (éds), Cambridge/New York, CUP, 2011.

MOUREAUX, C., *Mesure de flux de CO₂ et bilan carboné d'une rotation de quatre cultures*, Thèse de doctorat, Université de Liège – Gembloux Agro Bio Tech, 2008.

MOURON, P., NEMECEK, T., SCHOLZ, R. et WEBER, O., « Management influence on environmental impacts in an apple production system on Swiss fruit farms: combining life cycle assessment with statistical risk assessment », *Agriculture, Ecosystems and Environment*, n° 114, 2006, pp. 311-322.

MÜLLER CARNEIRO, J., FERREIRA DIAS, A., DA SILVA BARROS, V., GIONGO, V., DA SILVEIRA FOLEGATTI MATSUURA, M.I. et DE FIGUEIRÊDO, M.C.B., « Carbon and water footprints of Brazilian mango produced in the semiarid region », *Int'l J. LCA*, n° 24, 2019, pp. 735-752.

MURDIYARSO, D., HERGOUALC'H, K. et VERCHOT, L.V., « Opportunities for reducing greenhouse gas emissions in tropical peatlands », *PNAS*, n° 107 (46), 2010, pp. 19655-19660.

NICOLARDOT, B. et GERMON, J.-C., « Les émissions de méthane (CH₄) et d'oxydes d'azote (N₂O et NO_x) : aspects généraux et effet du non-travail du sol », *Étude et gestion des sols*, vol. 15, n° 3, 2008, pp. 171-182.

O'HALLORAN, N., FISHER, P. et RAB, A., « Vegetable industry carbon footprint scoping study », Doc. de travail n° 6, *Options for mitigating greenhouse gas emissions for the Australian vegetable industry*, Horticulture Australia Ltd., 2008.

ONDIER, *et al.*, « Influence of rainfall amount and livestock grazing on soil respiration in a moist Kenyan savannah », *Afr J. Ecol.*, 2019, pp. 1-8.

OORTIS, K. *et al.*, *Effect of tillage systems on soil organic matter stocks and C and N fluxes in cereals cropping systems on a silt loam soil in Northern France*, Louvan/Paris, KUL/INA-PG, 2006.

PAUSTIAN, K., SIX, J., ELLIOTT, E.T. et HUNT, H.W., « Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils », *Biogeochemistry*, n° 48, 2000, pp. 147-163.

PCF Project, « Fallstudie 'Best Alliance' – Früherdbeeren der REWE Group », Documentation, Fallstudie im Rahmen des PCF (Product Carbon Footprint), Projet-pilote Allemagne, 2009.

PCF Project, « Case study Tchibo Privat Kaffee Rarity Machare by Tchibo GmbH », Documentation, Étude de cas réalisée au sein du PCF, Projet-pilote Allemagne, 2009.

PELLERIN, S., « Quels leviers d'action pour réduire les émissions de gaz à effet de serre en agriculture ? », *Science et impact*, INRA, 2017.

PLASSMANN, K. et EDWARDS-JONES, G., « Carbon footprinting and carbon labelling of food products », in Sonesson, U., Berlin, J. et Ziegler, F. (éds), *Environmental assessment and management in the food industry – Life cycle assessment and related approaches*, coll. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition n° 194, Cambridge, CRC Press, 2010.

PLASSMANN, K., « Direct and indirect land use change », in Kaltschmitt, M. et Neuling, U. (éds), *Biokerosene – status and prospects*, Berlin, Springer, 2017.

PLASSMANN, K., NORTON, A., ATTARZADEH, N., JENSEN, M.F., BRENTON, P. et EDWARDS-JONES, G., « Methodological complexities of carbon footprinting: a sensitivity analysis of key variables in a developing country context », *Environ. Sci. & Pol.*, n° 13, 2010, pp. 393-404.

PRBCC, « Inventaire des gaz à effet de serre du Bénin – secteur agriculture », 2018.

PRETTY, J.N., NOBLE, A.D., BOSSIO, D., DIXON, D., HINE, R.E., PENNING DE VRIES, F.W.T. et MORISON, J.I.L., « Resource-conserving agriculture increases yields in developing countries », *Environ. Sci. & Technol.*, n° 40, 2006, pp. 1114-1119.

ROCHETTE, P., « No-till only increases N2O emissions in poorly aerated soils », *Soil & Tillage Res'ch*, n° 101, 2008, pp. 97-100.

ROYAL SOCIETY, *Reaping the benefits: science and the sustainable intensification of global agriculture*, Londres, The Royal Society, 2009.

SANUSI, A.A., *Comportement physico-chimique et transport des pesticides particulaires et gazeux dans l'atmosphère*, Thèse de doctorat de 3^e cycle, Strasbourg, Université Louis Pasteur, 1996, pp. 22-72

SANZ, M.J., DE VENTE, J., CHOTTE, J.-L., BERNOUX, M., KUST, G., RUIZ, I., ALMAGRO, M., ALLOZA, J.-A., VALLEJO, R., CASTILLO, V., HEBEL, A. ET AKHTAR-SCHUSTER, M., *Sustainable Land Management contribution to successful land-based climate change adaptation and mitigation*, Bonn, UNCCD, 2017.

SIM, S., BARRY, M., CLIFT, R. ET COWELL, S., « The relative importance of transport in determining an appropriate sustainability strategy for food sourcing. A case study of fresh produce supply chains », *Int'l J. LCA*, n° 12, 2007, pp. 422-431.

SIX, J. *et al.*, « Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – effects of no-tillage », *Agronomie*, n° 22, 2002, pp. 755-775.

SMITH, P., BUSTAMANTE, M., AHAMMAD, H., CLARK, H., DONG, H., ELSIDDIG, E.A., HABERL, H., HARPER, R., HOUSE, J., JAFARI, M., MASERA, O., MBOW, C.,

RAVINDRANATH, N.H., RICE, C.W., ROBLEDO ABAD, C., ROMANOVSKAYA, A., SPERLING, F. ET TUBIELLO, F., « AGRICULTURE, FORESTRY AND OTHER LAND USE (AFOLU) », IN EDENHOFER, O., PICHES-MADRUGA, R., SOKONA, Y., FARAHANI, E., KADNER, S., SEYBOTH, K., ADLER, A., BAUM, I., BRUNNER, S., EICKEMEIER, P., KRIEMANN, B., SAVOLAINEN, J., SCHLÖMER, S., VON STECHOW, C., ZWICKEL, T. ET MINX, J.C. (ÉDS), *Climate change 2014: mitigation of climate change*, Contribution au groupe de travail III pour le 5^e Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Cambridge, CUP, 2014.

SMITH, P., MARTINO, D., CAI, Z., GWARY, D., JANZEN, H., KUMAR, P., MCCARL, B., OGLE, S., O'MARA, F., RICE, C., SCHOLLES, B., SIROTENKO, O., HOWDEN, M., MCALLISTER, T., PAN, G., ROMANENKOV, V., SCHNEIDER, U., TOWPRAYOON, S., WATTENBACH, M. et SMITH, J., « Greenhouse gas mitigation in agriculture », *Philosophical Transactions of the Royal Society*, n° B 363, 2008, pp. 789-813.

SOLAGRO, *Afterres 2050 : Scénario d'utilisation des terres agricoles et forestières pour satisfaire les besoins en alimentation, en énergie, en matériaux, et réduire les gaz à effet de serre*, Toulouse, Solagro, 2011.

SONESSON, U., DAVIS, J. et ZIEGLER, F., *Food production and emissions of greenhouse gases. An overview of the climate impact of different product groups*, Rapport SIK, 2010.

STOESSEL, F., JURASKE, R., PFISTER, S. ET HELLWEG, S., « Life cycle inventory and carbon and water FoodPrint of fruits and vegetables: application to a Swiss retailer », *Environ. Sci. & Technol.*, n° 46, 2012, pp. 3253-3262.

SVANES, E. ET ARONSSON, A.K.S., « Carbon footprint of a Cavendish banana supply chain », *Int'l J. LCA*, 2013.

SVUBURE, O., STRUIK, P.C., HAVERKORT, A.J. ET STEYN, J.M., « Carbon footprinting of potato (*Solanum tuberosum* L.) production systems in Zimbabwe », *Outlook on Agriculture*, n° 47, 2018, pp. 3-10.

VAN ASTEN, P., OCHOLA, D., WAIREGI, L., NIBASUMBA, A., JASSOGNE, L. ET MUSAKA, D., « Coffee-banana intercropping: implementation guidance for policymakers and investors », 2015, cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/69017/CCAFSpbCoffee-Banana.pdf [consulté en août 2019].

VAN KESSEL, C. *et al.*, « Climate, duration, and N placement determine N₂O emissions in reduced tillage systems: a meta-analysis », *Global Change Biology*, n° 19, 2013, pp. 33-44.

VANDAELE, D., LEBRETON, A. ET FARACO, B., « Agriculture et gaz à effet de serre : état des lieux et perspectives », Fondation Nicolas Hulot pour la nature et l'homme, 2010.

VENTEREA *et al.*, « Nitrogen oxide and methane emissions under varying tillage and fertilizer management », *J. Environ. Qual'y*, 2005.

VENTEREA, R.T. et Griffis, T.J., « Tillage and soil carbon sequestration – what do we really know? », *Agric. Ecosyst. Environ.*, n° 118, 2007, pp. 1-5.

VERMEULEN, S., CAMPBELL, B. et INGRAM, J., « Climate change and food systems », *Annual Rev. Environ. & Resources*, n° 37, 2012, pp. 195-222.

WILTSHIRE, J., TUCKER, G., WILLIAMS, A.G., FOSTER, C., WYNN, S., THORN, R. et CHADWICK, D., *Scenario building to test and inform the development of a BSI method for assessing GHG emissions from food*, Defra research report F00404, 2009.

ZUMBADO, M., GOETHALS, M., ÁLVAREZ-LEÓN, E.E., LUZARDO, O.P., CABRERA, F., SERRA-MAJEM, L. *et al.*, « Inadvertent exposure to organochlorine pesticides DDT and derivatives in people from the Canary Islands (Spain) », *Science of The Total Environment*, vol. 339, 2005, pp. 4962.



Sites Web utiles

SITES WEB UTILES

ADEME

www.mtaterre.fr/dossiers/le-changement-climatique/trop-de-gaz-effet-de-serre-dans-latmosphere

Compte CO₂

www.compteco2.com/article/effet-de-serre-fonctionnement/

Connaissance des énergies

www.connaissancedesenergies.org/bp-statistical-review-world-energy-2018-les-chiffres-cles-de-lenergie-dans-le-monde-180614

ÉCOMET

www.ecomet.fr/V22_effet_serre.html

Encyclopédie de l'environnement

www.encyclopedie-environnement.org/vivant/cycle-du-carbone/

FUTURA

www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/rechauffement-climatique-reduire-gaz-effet-serre-stopper-rechauffement-1084/

United Nations Climate Change

unfccc.int/fr/node/513

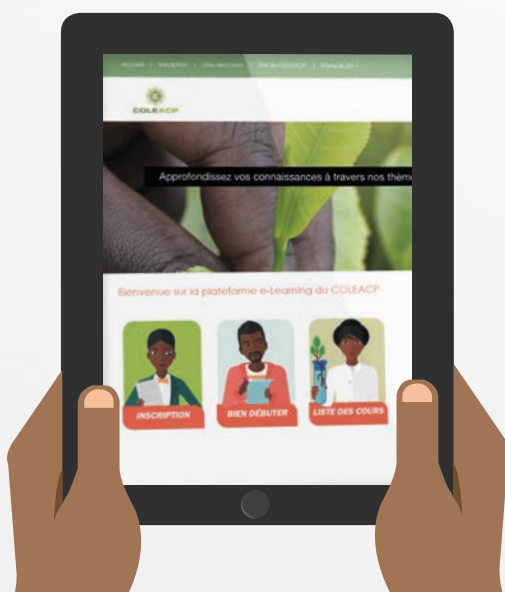
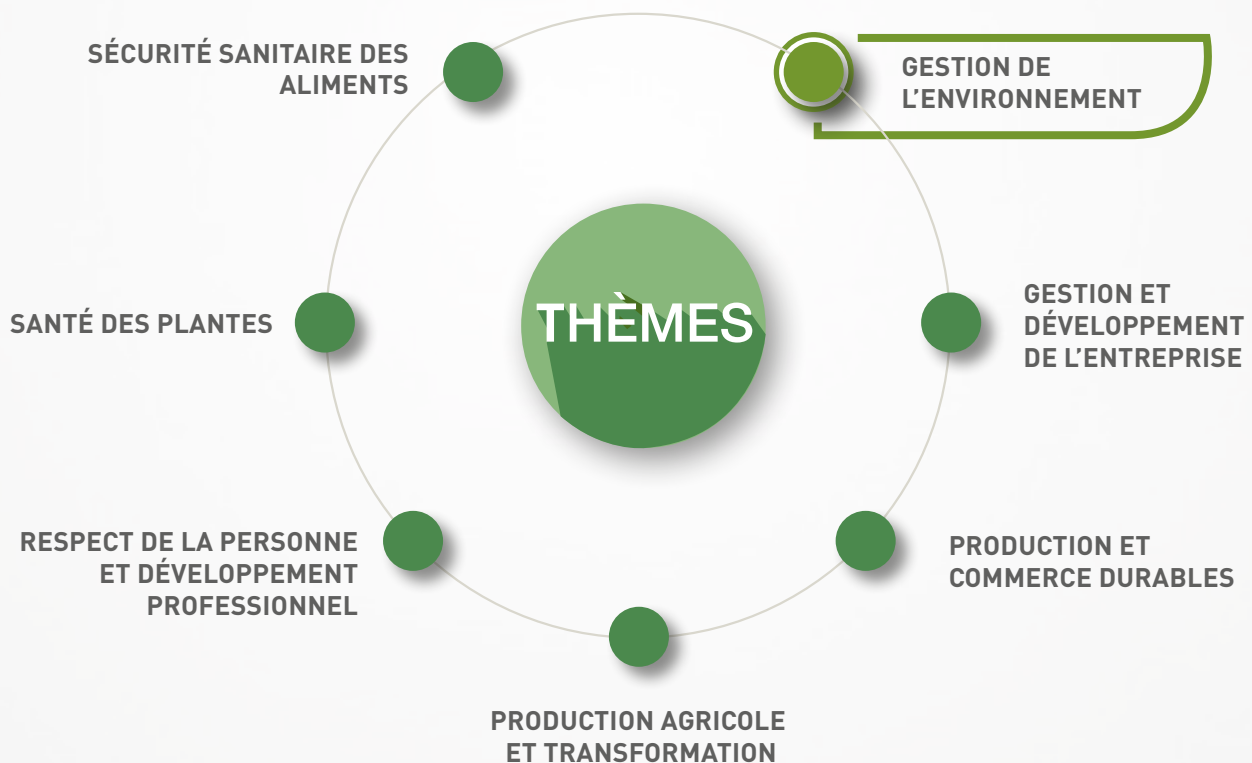
Wiktionnaire

fr.wiktionary.org/wiki/climat

PLATEFORME E-LEARNING DU COLEACP

RECEVEZ VOTRE ACCÈS À NOTRE PLATEFORME DE FORMATION À DISTANCE
RÉSERVÉE AUX ACTEURS DU SECTEUR AGRICOLE DANS LES PAYS D'AFRIQUE, DES
CARAÏBES ET DU PACIFIQUE.

TESTEZ ET AMÉLIOREZ VOS CONNAISSANCES
À VOTRE RYTHME !



<https://training.coleacp.org>

PRODUCTION ET COMMERCE
DURABLES

SANTÉ DES PLANTES

SÉCURITÉ SANITAIRE DES
ALIMENTS

PRODUCTION AGRICOLE ET
TRANSFORMATION

RESPECT DE LA PERSONNE ET
DÉVELOPPEMENT PROFESSIONNEL

**GESTION DE
L'ENVIRONNEMENT**

GESTION ET DÉVELOPPEMENT
DE L'ENTREPRISE

MÉTHODOLOGIES DE
FORMATION