



HAL
open science

Intérêts écologiques et économiques d'une réduction des émissions de gaz à effet de serre : application aux aérosols pharmaceutiques

Nicolas Mollex

► **To cite this version:**

Nicolas Mollex. Intérêts écologiques et économiques d'une réduction des émissions de gaz à effet de serre : application aux aérosols pharmaceutiques. Sciences pharmaceutiques. 2012. dumas-00761267

HAL Id: dumas-00761267

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00761267>

Submitted on 5 Dec 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il n'a pas été réévalué depuis la date de soutenance.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact au SICD1 de Grenoble : thesebum@ujf-grenoble.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

UNIVERSITE JOSEPH FOURIER
FACULTE DE PHARMACIE DE GRENOBLE

Année : 2012

N°

**INTERETS ECOLOGIQUES ET ECONOMIQUES D'UNE REDUCTION
DES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE : APPLICATION AUX
AEROSOLS PHARMACEUTIQUES.**

THESE

PRESENTEE POUR L'OBTENTION DU TITRE DE DOCTEUR EN PHARMACIE
DIPLOME D'ETAT

Nicolas MOLLEX

Né le 19 février 1986 à Aix-les-Bains (73)

THESE SOUTENUE PUBLIQUEMENT A LA FACULTE DE PHARMACIE DE
GRENOBLE

Le Vendredi 30 novembre 2012

DEVANT LE JURY COMPOSE DE :

Président du jury :

Docteur M. Aziz BAKRI, Professeur à l'UFR de Pharmacie

Directeur de thèse :

Madame Valérie PAUL, Chef de projet Production, GlaxoSmithKline

Membres :

Docteur Mlle Nawel KHALEF, Maître de Conférences à l'UFR de Pharmacie

Monsieur Nicolas RAGOT, Directeur de site de Production, GlaxoSmithKline

La Faculté de Pharmacie de Grenoble n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les thèses ; ces opinions sont considérées comme propres à leurs auteurs.

UFR de Pharmacie de Grenoble

DOMAINE DE LA MERCI
38706 LA TRONCHE CEDEX – France
TEL : +33 (0)4 76 63 71 00
FAX : +33 (0)4 76 63 71 70



Directeur de l'UFR : **M. Pr. Christophe RIBUOT**
Vice-doyen et Directeur des Etudes : **Mme Delphine ALDEBERT**

Année 2012-2013

PROFESSEURS A L'UFR DE PHARMACIE (n = 17)

BAKRI	Aziz	Pharmacie Galénique et Industrielle, Formulation et Procédés Pharmaceutiques (TIMC-IMAG)
BOUMENDJEL	Ahcène	Chimie Organique (D.P.M.)
BURMEISTER	Wim	Biophysique (U.V.H.C.I)
CALOP	Jean	Pharmacie Clinique (TIMC-IMAG, PU-PH)
CORNET	Murielle	Parasitologie – Mycologie Médicale (LAPM, PU-PH)
DANEL	Vincent	Toxicologie (SMUR SAMU / PU-PH)
DECOUT	Jean-Luc	Chimie Inorganique (D.P.M.)
DROUET	Christian	Immunologie Médicale (TIMC-IMAG)
DROUET	Emmanuel	Microbiologie (U.V.H.C.I)
FAURE	Patrice	Biochimie (HP2/PU-PH)
GODIN-RIBUOT	Diane	Physiologie-Pharmacologie (HP2)
LENORMAND	Jean Luc	Ingénierie Cellulaire, Biothérapies (THEREX, TIMC, IMAG)
MOSSUZ	Pascal	Hématologie (PU-PH)
PEYRIN	Eric	Chimie Analytique (D.P.M.)
SEVE	Michel	Biochimie – Biotechnologie (IAB, PU-PH)
RIBUOT	Christophe	Physiologie – Pharmacologie (HP2)
WOUESSIDJEWE	Denis	Pharmacotechnie (D.P.M.)

PROFESSEURS ASSOCIES (PAST) (n=4)

BELLET	Béatrice	Pharmacie Clinique
MARTIN	Don	Biotechnologie (TIMC-IMAG)
RIEU	Isabelle	Qualitologie (Praticien Attaché – CHU)
TROUILLER	Patrice	Santé Publique (Praticien Hospitalier – CHU)

PROFESSEUR AGREGE (n=1)

GAUCHARD	Pierre Alexis	Chimie Biochimie (D.P.M)
-----------------	---------------	--------------------------

Dernière mise à jour : 13/12/11

Rédacteur : L.FAURE, Secrétaire du Directeur

DOMAINE DE LA MERCI – 38706 LA TRONCHE CEDEX – France - TEL : +33 (0)4 75 63 71 00 – FAX : +33 (0)4 75 63 71 70

UFR de Pharmacie de Grenoble

DOMAINE DE LA MERCI
38706 LA TRONCHE CEDEX – France
TEL : +33 (0)4 76 63 71 00
FAX : +33 (0)4 76 63 71 70



PROFESSEURS EMERITES (n=2)

GRILLOT	Renée
ROUSSEL	Anne Marie

ATER : Attachés Temporaires d'Enseignement et de Recherches
CHU : Centre Hospitalier Universitaire
CIB : Centre d'Innovation en Biologie
DPM : Département de Pharmacochimie Moléculaire
HP2 : Hypoxie Physiopathologie Respiratoire et Cardiovasculaire
IAB : Institut Albert Bonniot, Centre de Recherche « Oncogenèse et Ontogenèse »
IBS : Institut de Biologie Structurale
JR : Jean Roget
LAPM : Laboratoire Adaptation et Pathogenèse des Microorganismes
LBFA : Laboratoire Bioénergétique Fondamentale et Appliquée
LCBM : Laboratoire Chimie et Biologie des Métaux
LCIB : Laboratoire de Chimie Inorganique et Biologie
LECA : Laboratoire d'Ecologie Alpine
LR : Laboratoire des Radio pharmaceutiques
PAST : Professeur Associé à Temps Partiel
PRAG : Professeur Agrégé
TIMC-IMAG : Laboratoire Technique de l'Imagerie, de la Modélisation et de Cognition
UVHCI : Unit of Virus Host Cell Interactions

Directeur de l'UFR : **M. Pr. Christophe RIBUOT**
Vice-doyen et Directeur des Etudes : **Mme Delphine ALDEBERT**

Année 2012-2013

MAITRE DE CONFERENCES DE PHARMACIE (n = 35)

ALDEBERT	Delphine	Parasitologie-Mycologie (L.A.P.M)
ALLENET	Benoît	Pharmacie Clinique (ThEMAS TIMC-IMAG / MCU-PH)
BATANDIER	Cécile	Nutrition et Physiologie (L.B.F.A)
BOURGOIN	Sandrine	Biochimie – Biotechnologie (IAB)
BRETON	Jean	Biologie Moléculaire / Biochimie (L.C.I.B – LAN)
BRIANCON-MARJOLLET	Anne	Physiologie Pharmacologie (HP2)
BUDAYOVA SPANO	Monika	Biophysique (I.B.S)
CAVAILLES	Pierre	Biologie Cellulaire et génétique (L.A.P.M)
CHOISNARD	Luc	Pharmacotechnie (D.P.M)
DELETRAZ-DELPORTE	Martine	Droit Pharmaceutique (Equipe SIS « Santé, Individu, Société »-EAM 4128)
DEMEILLIERS	Christine	Biochimie (L.B.F.A)
DURMORT-MEUNIER	Claire	Biotechnologies (I.B.S)
GEZE	Annabelle	Pharmacotechnie (D.P.M)
GERMI	Raphaëlle	Microbiologie (U.V.H.C.I / MCU-PH)
GILLY	Catherine	Chimie Thérapeutique (D.P.M)
GROSSET	Catherine	Chimie Analytique (D.P.M)
GUIEU	Valérie	Chimie Analytique (D.P.M)
HININGER-FAVIER	Isabelle	Biochimie (L.B.F.A)
JOYEUX-FAURE	Marie	Physiologie - Pharmacologie (HP2)
KHALEF	Nawel	Pharmacie Galénique (TIMC-IMAG)
KRIVOBOK	Serge	Biologie Végétale et Botanique (L.C.B.M)
MOUHAMADOU	Bello	Cryptogamie, Mycologie Générale (L.E.C.A)
MORAND	Jean-Marc	Chimie Thérapeutique (D.P.M)
MELO DE LIMA	Christelle	Biostatistiques (L.E.C.A)
NICOLLE	Edwige	Chimie Thérapeutique (D.P.M)
PERES	Basile	Pharmacognosie (D.P.M)
PEUCHMAUR	Marine	Chimie Organique (D.P.M.)
RACHIDI	Walid	Biochimie (L.C.I.B)
RAVEL	Anne	Chimie Analytique (D.P.M)
RAVELET	Corinne	Chimie Analytique (D.P.M)
SOUARD	Florence	Pharmacognosie (D.P.M)
TARBOURIECH	Nicolas	Biophysique (U.V.H.C.I.)
VANHAVERBEKE	Cécile	Chimie Organique (D.P.M.)

UFR de Pharmacie de Grenoble

DOMAINE DE LA MERCI
38706 LA TRONCHE CEDEX – France
TEL : +33 (0)4 75 63 71 00
FAX : +33 (0)4 75 63 71 70



ASSISTANTS HOSPITALO-UNIVERSITAIRES (AHU) (n=2)

VAN NOOLEN	Laëtitia	Biochimie (HP2, AHU-Biochimie)
------------	----------	--------------------------------

ENSEIGNANTS ANGLAIS (n=3)

BIROS	Camille	Professeur Certifié
FITE	Andrée	Professeur Certifié
GOUBIER	Laurence	professeur Certifié

ATER (n= 6)

Mathieu FAVIER	ATER
Sylvia LEHMANN	ATER
Anis ADDAD-AMANOU	ATER
David DAYDE	ATER
Myriam REGENT-KLOECKNER	½ ATER
Marion HENRI	½ ATER

MONITEUR ET DOCTORANTS CONTRACTUELS (n=10)

BOUCHET	Audrey	(01-10-2009 au 30-09-2012)	Biotechnologie (GIN, ESRF)
CAVAREC	Fanny	(01-10-2011 au 30-09-2014)	Laboratoire HP2 (JR)
FAVIER	Mathieu	(01-10-2009 au 30-09-2012)	Laboratoire HP2 (JR)
GRAS	Emmanuelle	(01-10-2010 au 30-09-2013)	Laboratoire HP2 (JR)
LESART	Anne-Cécile	(01-10-2009 au 30-09-2013)	Informatique C2i
MELAINE	Feriel	(01-10-2011 au 30-09-2014)	Laboratoire HP2(JR)
NASRALLAH	Chady	(01-10-2011 au 30-09-2014)	Laboratoire HP2(JR)
POULAIN	Laureline	(01-10-2009 au 30-09-2012)	Laboratoire HP2 (JR)
THOMAS	Amandine	(01-10-2011 au 30-09-2014)	Laboratoire HP2 (JR)

ATER : Attachés Temporaires d'Enseignement et de Recherches
CHU : Centre Hospitalier Universitaire
CIB : Centre d'Innovation en Biologie
DPM : Département de Pharmacochimie Moléculaire
HP2 : Hypoxie Physiopathologie Respiratoire et Cardiovasculaire
IAB : Institut Albert Bonniot, Centre de Recherche « Oncogenèse et Ontogénèse »
IBS : Institut de Biologie Structurale
JR : Jean Roget
LAPM : Laboratoire Adaptation et Pathogénèse des Microorganismes
LBFA : Laboratoire Bioénergétique Fondamentale et Appliquée
LCBM : Laboratoire Chimie et Biologie des Métaux
LCIB : Laboratoire de Chimie Inorganique et Biologie
LECA : Laboratoire d'Ecologie Alpine
LR : Laboratoire des Radio pharmaceutiques
PAST : Professeur Associé à Temps Partiel
PRAG : Professeur Agrégé
TIMC-IMAG : Laboratoire Technique de l'Imagerie, de la Modélisation et de Cognition
UVHCI : Unit of Virus Host Cell Interactions

Dernière mise à jour : 08/09/201112/09/2012

Rédacteur : L.FAURE; Secrétaire du Doyen

DOMAINE DE LA MERCI – 38706 LA TRONCHE CEDEX – France - TEL : +33 (0)4 75 63 71 00 – FAX : +33 (0)4 75 63 71 70

"Nul besoin de faire de la Terre un paradis : elle en est un.

A nous de nous adapter pour l'habiter."

Henry Miller

A mon Papi,

Remerciements

A **Madame Valérie Paul**, pour sa façon de voir les choses, ses conseils avisés, l'attention qu'elle m'a apportée tout au long du stage de fin d'études universitaires, et pour son management. Merci d'avoir accepté de participer à cette aventure à mes côtés.

Au **Professeur Aziz Bakri**, qui a su me transmettre sa passion de la Pharmacie Industrielle, grâce à son enseignement de qualité.

A **Monsieur Nicolas Ragot**, pour sa connaissance du monde industriel actuel, et ses précieux conseils sur mon avenir professionnel.

Au **Docteur Nawel Khalef**, pour ses compétences en Génie des Procédés et son enseignement en Pharmacie Galénique.

A l'équipe enseignante de la Faculté de Pharmacie de Grenoble, pour son accompagnement, tout au long de mes 6 années d'études en Pharmacie.

A **mes parents**, qui ont su nous enseigner des valeurs primordiales, telles que celle de la famille et de l'amitié, ainsi que pour leur soutien, dans nos choix de vie. Merci à eux de nous avoir appris à profiter de chaque moment, en toute simplicité. Vous êtes mes piliers.

A **ma sœur Elodie**, sans qui nos bagarres d'enfance n'auraient eu aucun sens, et à **Laurent son époux**, d'avoir pris mon relais. Merci à vous deux, et je vous souhaite beaucoup de bonheur dans votre vie.

A **mes grands-parents maternels**, pour leurs encouragements et leurs enseignements.

A mon Grand-Père, pour sa participation à chaque instant, dans mes travaux universitaires, et à ma Grand-Mère, pour tous ses bons petits plats, tout au long de ces années. Je vous embrasse tous deux affectueusement.

A mes grands-parents paternels, pour leur joie de vivre, et de m'avoir montré que la vie peut être heureuse, si nous décidons qu'elle le soit.

A mon Papi, qui aurait aimé être présent, mais qui je le souhaite, me suit de là haut... Et à ma Mamie, qui m'a permis de découvrir de nombreuses formes d'art, et pour son sourire, qui m'a beaucoup aidé à franchir les moments difficiles.

A mon oncle Christian et ma tante Blandine, qui sont pour moi, comme mes seconds parents. Merci d'avoir été, et d'être toujours présents pour moi, dans les bons moments, comme dans les épreuves.

A ma tante Brigitte et mon oncle Roland, qui m'ont accompagné pendant toutes ces années.

A Françoise, Maxime et Anthony, ma nouvelle famille Corse, pour leur hospitalité et leur gentillesse.

Au personnel de l'Entreprise où le stage de fin d'études a été réalisé,

A M. Philippe Doucet, pour m'avoir permis d'effectuer le stage, au sein d'une entreprise spécialisée dans la production d'aérosols pharmaceutiques.

A Mme Cynthia Leledier, pour son investissement dans le projet d'optimisation de la gestion du gaz propulseur, ainsi que le temps qu'elle m'a accordé afin de confronter nos idées.

A Mlle Anne-Lise Chantereau, M. Stéphane Basel, M. Jean-Luc Louise de l'équipe projet, qui m'ont accompagné tout au long du stage et qui ont partagé avec moi, leurs expériences et leurs problématiques sur leurs projets.

A M. Patrick Turlier, M. Gireg Chauvel, M. Vincent Crochemore et Mme Séverine Aubry pour leurs conseils avisés.

M. Stéphane Rabet, M. Laurent Dubuc, M. Sébastien Lesueur, Mme Bénédicte Genies, M. Pascal Omont et M. Michael Sauvage, pour leur sympathie et leur convivialité.

Aux opérateurs du remplissage, ainsi que ceux du conditionnement de l'unité MDI, pour le temps qu'ils m'ont consacré, à décrire leurs métiers.

Aux personnes qui m'ont apporté leur aide, tout au long de mes études,

A Madame Berlioz, pour m'avoir permis de découvrir la Pharmacie Hospitalière, dès mon plus jeune âge, et également, de m'avoir permis d'acquérir un complément de connaissances, lors du stage de 5^{ème} année AHU.

Au Dr François Serratrice, pour ses conseils, son pragmatisme, et sa volonté contagieuse d'œuvrer, pour l'amélioration du Système de Santé autour du patient.

Au Dr Frank Gerin, pour ses compétences en gestion, mais également pour sa gentillesse et son écoute.

Au Dr Emeline Blondel, pour ses connaissances en Pharmacie Clinique, et pour son investissement dans des projets valorisant le rôle du Pharmacien Clinicien, telle que l'étude clinique EMPHASE.

Aux Préparatrices Maryse, Francine, Nelly et le reste de l'équipe de la Pharmacie hospitalière d'Aix les bains, pour leur convivialité et leur sympathie.

Au Dr. Jérôme Repiton et le Dr. Philippe Buttier pour tous leurs précieux conseils, ainsi que de l'opportunité qu'ils m'ont offerte, de pouvoir découvrir l'Industrie Pharmaceutique et le fonctionnement d'un service de Production.

A mes amis,

Victor, Pauline, Anne Sophie et Frédéric pour nos souvenirs d'enfance.

Julien, Sylvain et Arnaud, pour leur amitié à toute épreuve, depuis tant d'années.

A Atol, Thomas, Fabien, Alexandre, Michael, Virginie, Laure-line, Yann, Sébastien et Denis, pour les incroyables moments passés ensemble, au lycée de Marlioz, et au lac d'Aix les Bains.

A Clarisse et Audelyne, pour les difficultés que nous avons traversées ensemble, mais aussi pour nos fous rires mémorables.

A Paulo et Marion, pour avoir été tout au long de nos études, un couple de joyeux drilles et des amis formidables.

A Bruno, pour avoir été un binôme fabuleux, et un ami remarquable.

A Nathalie, Sophie et Samuel, pour avoir traversé ensemble, l'épreuve du projet médicament « Gin2SN ». Merci pour votre enthousiasme et votre gentillesse.

A Paloma, Thibaut, Hugo, Marine Raffard, Julia, Remi et Linda, Thomas, Christine, Charlotte, Céline, Natalie et Pascal, Marie, Fanny et Damien, Adrien, Marine, Amélie et Hervé, pour nos instants de bonheur, souvent autour d'un petit verre.

A Michael, Réda et Clément, pour notre collocation hétéroclite, et tous nos fous rires.

A Angéline, Adil, Chloé et Benoit de ma promotion du Master 2, pour nos discussions et tous les moments agréables partagés.

A mes nouveaux amis normands : Céline, Romain, Théo, Hélène et Benjamin, et le CAF d'Evreux, qui m'ont réappris à apprécier la Montagne, et la découverte de lieux insolites.

Aux Amis de mes parents,

Patrick et Michelle, Françoise et Bernard, Nicole et Jeannot, Jacqueline et Jacky, Daniel et Martine, Camille et Michel, Michelle et Janine, qui m'ont permis de découvrir l'importance de l'amitié.

Sommaire

Remerciements.....	8
Sommaire.....	12
Tables des illustrations.....	15
Définitions et Acronymes	18
Introduction	20
1^{ère} partie : Lien entre les gaz à effet de serre émis, par l'activité humaine et le climat..	22
1 Le climat	23
1.1 La machine climatique	23
1.1.1 La définition du climat :	23
1.2 L'évolution du climat.....	29
1.2.1 Les preuves d'un réchauffement climatique	29
1.2.2 Les Origines des données	33
2 Les gaz à effet de serre	37
2.1 Les gaz à effet de serre (GES).....	37
2.2 L'origine naturelle	40
2.3 L'origine anthropique (liée à l'activité humaine)	40
3 Le lien entre le climat et les gaz à effet de serre	42
3.1 Les perturbations climatiques et l'augmentation des émissions de GES	42
3.2 Les projections	45
4 Les conséquences attendues des perturbations climatiques	48
4.1 Les conséquences environnementales.....	48
4.2 Les conséquences socio-économiques	49
2^{ème} partie : Les actions contre le réchauffement climatique anthropique.	53
1 La politique écologique internationale	54
1.1 Chronologie de la politique écologique mondiale	54
1.2 Le Traité de Kyôto	58
1.3 Les résultats actuels.....	64
2 La politique écologique française.....	68
2.1 Le « Grenelle de l'environnement ».....	69
2.2 Quelques chiffres de la France	70

3^{ème} partie : Les politiques environnementales des industries du médicament :

Application aux aérosols pharmaceutiques.....	77
1 Les préparations pour inhalation.....	78
1.1 Les “MDI” (metered dose inhaler), inhalateur pressurisé à valve doseuse.....	78
1.1.1 Définition de la pharmacopée européenne :	78
1.1.2 Les composants.	79
1.1.3 Le gaz propulseur : HFC 134a	79
1.2 Le processus de fabrication.	81
2 La présentation des projets.....	82
2.1 L’environnement des projets.....	82
2.2 Les avantages écologiques et économiques.	84
3 Les projets d’optimisation de la gestion de stock en gaz propulseur dans les aérosols pharmaceutiques.	85
3.1 Le plan directeur du projet.	85
3.1.1 Le contexte du projet.....	85
3.1.2 Les objectifs.	85
3.1.3 Les gains attendus.	85
3.1.4 Le périmètre du projet.	86
3.1.5 Les acteurs.	86
3.1.6 La méthode choisie.....	87
3.2 Les résultats du projet.	90
3.2.1 La définition du problème.	90
3.2.2 Les mesures et les analyses de la situation actuelle.	90
3.2.3 Les innovations.	103
3.2.4 Les contrôles.	103
3.2.5 Les conclusions du projet.....	104
4 Les autres projets visant à diminuer les émissions de gaz à effet de serre.....	105
4.1 Le plan directeur du projet : L’optimisation des procédés de rinçage et de nettoyage.....	105
4.1.1 Le contexte du projet.....	105
4.1.2 Les objectifs.	106
4.1.3 Les gains attendus.	106
4.1.4 Le périmètre du projet.	107
4.1.5 Les acteurs.....	107
4.1.6 La méthode choisie.....	108
4.2 Le plan directeur du projet : L’optimisation d’une étape de production.....	110
4.2.1 Le contexte du projet.....	110
4.2.2 Les objectifs.	110
4.2.3 Les gains attendus.	111
4.2.4 Le périmètre du projet.	111
4.2.5 Les acteurs.....	111
4.2.6 La méthode choisie.....	112

Conclusion	114
Bibliographie.....	116
Annexes.....	119
Annexe A : Pays industrialisés inscrits en annexe du Protocole de Kyôto.	120
Annexe B : Exemples des principales technologies d'atténuation, des politiques et mesures connexes et des conditions favorables ou défavorables à leur application, par secteur.	121

Tables des illustrations

- **Liste des Figures :**

Figure 1. Les principaux mécanismes de l'équilibre climatique de la Terre (2).....	24
Figure 2. Excentricité de l'orbite terrestre	25
Figure 3. L'obliquité de la Terre	26
Figure 4. La précession de la Terre à l'équinoxe	26
Figure 5. Schéma représentant l'effet de serre sur Terre.	27
Figure 6. Spectre de longueur d'onde (6).....	28
Figure 7. Été 1900 : Carte postale du Glacier Blanc, Massif des Ecrins, 3500m.....	30
Figure 8. 1995 ; 2001 : Mesures du front du glacier Blanc depuis un point fixe. Photos : Joel Faure, Emmanuel Thibert (8)	31
Figure 9. Été 2012 : Photographie personnelle du Glacier Blanc, Massif des Ecrins.	32
Figure 10. Variations de la température et du niveau de la mer à l'échelle du globe et de la couverture neigeuse dans l'hémisphère Nord. (7).	32
Figure 11. Méthode de recueil des cernes des arbres (10).....	34
Figure 12. Variations de la température à la surface de la Terre, au cours des 140 dernières années. (11).....	36
Figure 13. Répartition des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. (2).....	38
Figure 14. Emissions mondiales de gaz à effet de serre anthropiques, de 1970 à 2004 (7)....	40
Figure 15. Variations de la température à la surface de la Terre, au cours des 1000 dernières années. (11).....	42
Figure 16. Teneur en CO ₂ des carottes glaciaires antarctiques. (14).....	43
Figure 17. Taux instantané de croissance annuelle (ppb/an) de la teneur atmosphérique mondiale en CH ₄ , de 1983 à 1999	44
Figure 18. Scénarios d'émissions de GES pour la période 2000-2100 (en l'absence de politiques climatiques additionnelles), et projections relatives aux températures en surface ..	47
Figure 19. Exemples d'incidences associées à la variation de la température moyenne à la surface du globe (7)	48
Figure 20. Les 10 pays les plus gros émetteurs de CO ₂ en pourcentage, par rapport aux émissions mondiales en 1990 (37)	60
Figure 21. Evolution des émissions de CO ₂ de 1990 à 2009 des Etats Unis, Chine, Japon et de l'Inde (37).....	64
Figure 22. Evolution des émissions de CO ₂ de 1990 à 2009 du Royaume-Uni, du Canada, de l'Italie, de la France, de la Pologne et de l'Afrique du Sud. (37).....	65
Figure 23. Evolution des émissions de CO ₂ entre 1990 et 2009, des 10 plus importants émetteurs de CO ₂ de 1990. (37,28,28)	66

Figure 24. Chronologie des étapes majeures, dans la prise de conscience internationale. (13)	68
Figure 25. Emissions hors Utilisation des Terres, Changement d'affectation des Forêts (UTCF) et objectifs pour la France au sens de Kyoto en Mt équiv-CO2 (13)	70
Figure 26. Contribution des différents gaz à effet de serre au PRG en France métropolitaine, pour l'année 2010 (13)	70
Figure 27. Emissions atmosphériques de CO ₂ par secteur en France métropolitaine en Mt (13)	71
Figure 28. Emission de CO ₂ en France, entre 1990 et 2012 (13)	72
Figure 29. Emissions atmosphériques de HFC par secteur, en France métropolitaine en kt CO ₂ e (13)	74
Figure 30. Formule chimique du HFC 134a	79
Figure 31. Représentation schématique du processus de fabrication	81
Figure 32. Environnement des projets de réduction des émissions de gaz à effet de serre	82
Figure 33. Périmètre du projet 1	86
Figure 34. Représentation graphique du DMAIC	87
Figure 35. Représentation schématique des secteurs d'étude	91
Figure 36. Représentation graphique du secteur 1	92
Figure 37. Nombre de dépotages sur l'ensemble des cuves de stockage	93
Figure 38. Lien entre le nombre de dépotages et la température	94
Figure 39. Représentation schématique du secteur 2	95
Figure 40. Les écarts sur la ligne 1, depuis le début de l'année 2012	96
Figure 41. Les écarts cumulés sur la ligne 1, depuis le début de l'année 2012	96
Figure 42. Les écarts sur la ligne 2, depuis le début de l'année 2012	97
Figure 43. Les écarts cumulés sur la ligne 2, depuis le début de l'année 2012	97
Figure 44. Les écarts sur la ligne 3, depuis le début de l'année 2012	98
Figure 45. Les écarts cumulés sur la ligne 3, depuis le début de l'année 2012	98
Figure 46. Les écarts sur la ligne 4, depuis le début de l'année 2012	99
Figure 47. Les écarts cumulés sur la ligne 4, depuis le début de l'année 2012	99
Figure 48. Répartition des écarts sur la ligne 1	100
Figure 49. Répartition des écarts sur la ligne 2	100
Figure 50. Répartition des écarts sur la ligne 3	100
Figure 51. Répartition des écarts sur la ligne 4	100
Figure 52. Périmètre du projet 2	107
Figure 53. Périmètre du projet 3	111

• **Liste des Tableaux :**

Tableau 1. Caractéristiques des archives naturelles (4).....	34
Tableau 2. Récapitulatif des effets de serre (2)	39
Tableau 3. Les origines naturelles des GES (12)	40
Tableau 4. PRG en fonction des GES (13).....	42
Tableau 5. GES soumis à l'influence humaine (11)	45
Tableau 6. Les conséquences socio-économiques des changements climatiques anticipés (7).....	49
Tableau 7. Emissions de gaz carbonique exprimées en millions de tonnes (Mt). (39)	61
Tableau 8. Propriétés physico-chimiques (46)	80
Tableau 9. Propriétés de stockage (données fournisseur).....	80
Tableau 10. Processus de rinçage et de nettoyage actuel	105
Tableau 11. Processus de rinçage et de nettoyage optimisé	106
Tableau 12. Expérimentation pour la réduction de la quantité de gaz propulseur, lors de l'étape de purge	112
Tableau 13. Exemples des principales technologies d'atténuation, des politiques et mesures connexes et des conditions favorables ou défavorables, à leur application par secteur	121

Définitions et Acronymes

Al :	Aluminium
CFC :	ChloroFluoroCarbure
CH₄ :	Méthane
CO₂ :	Dioxyde de carbone
COV :	Composés Organiques Volatils
°C :	Degré Celsius
DMAIC :	« Définir, Mesurer, Analyser, Innover et Contrôler », Définir, Mesurer, Analyser, Innover et Contrôler.
EU ETS :	Directive européenne créant un système d'échange, de quotas de gaz à effet de serre.
g :	Gramme
GES :	Gaz à Effet de Serre
GIEC :	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
H₂O :	Eau
HFC :	HydroFluoroCarbure
J :	Joules
m :	Mètre
MDI :	« Metered Dose Inhaler », inhalateur pressurisé à valve doseuse

mol :	Mole
Mt :	Million de Tonnes
N :	Newton
N₂O :	Oxyde nitreux
O₃ :	Ozone
OMM :	Organisation Météorologique Mondiale
Pa :	Pascal
PFC :	PerFluoroCarbure
PNUE :	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
Ppm :	Partie par million
PRG :	Pouvoir de Réchauffement Global
Sn :	Etain
TEM :	pays « en Transition vers une Economie de Marché »
UNFCCC :	« United Nations Framework Convention on Climat Change », Convention-cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques.
UTCF :	Utilisation des terres, changement d'affectation et foresterie
W :	Watt
Zn :	Zinc

Introduction

La protection de l'environnement est devenue aujourd'hui, omniprésente dans notre vie quotidienne. L'objet de cette thèse d'exercice en Pharmacie Industrielle, concerne une partie de cette protection de l'environnement, il s'agit de la lutte contre les perturbations climatiques.

Actuellement, des phénomènes météorologiques dévastateurs, sévissent aux Etats Unis, mais aussi, aux quatre coins du globe. Il semblerait, qu'ils soient de plus en plus fréquents et témoigneraient de l'existence de perturbations climatiques. Les conséquences sanitaires et sociales, sont malheureusement considérables et démontrent la nécessité de s'intéresser, aux actions dans la lutte contre ces perturbations.

A l'image des actions internationales, visant à maîtriser les émissions de « gaz à effet de serre » anthropiques, de nombreuses Industries tous secteurs d'activité confondus, s'engagent de plus en plus souvent, dans des politiques écologiques.

C'est à l'occasion de 6 mois de stage, de fin d'études universitaires en Pharmacie Industrielle, que j'ai eu l'opportunité de découvrir, des actions entreprises par l'Industrie Pharmaceutique, afin de réduire son « empreinte carbone ».

Ce stage, a été réalisé au sein d'une entreprise hautement qualifiée, dans la production d'aérosols pharmaceutiques. Ces produits sont des inhalateurs pressurisés à valve doseuse, remplis de principes actifs, et de gaz propulseur, qui se révèle être, un important « gaz à effet de serre ».

L'objectif de cette thèse d'exercice en Pharmacie Industrielle, est de comprendre les intérêts écologiques et économiques, de la réduction des émissions de « gaz à effet de serre », ainsi que les méthodes utilisées dans les Industries du médicament.

Dans une première partie, nous nous intéresserons au lien existant entre les « gaz à effet de serre » anthropiques et les perturbations climatiques. Nous décrirons tout d'abord, d'une manière succincte et rapide, le fonctionnement du climat et les « gaz à effet de serre ». Nous comprendrons ainsi, le lien existant entre les deux, grâce aux projections des experts en Climatologie. Enfin, nous présenterons les conséquences environnementales et socio-économiques attendues de ces perturbations climatiques pour les années à venir.

Dans une seconde partie, nous nous focaliserons sur les actions déjà menées et à poursuivre, à l'encontre du réchauffement climatique. Dans un premier temps, les politiques écologiques internationales seront passées en revue, afin de mieux comprendre les raisons de nos actions nationales. Dans un second temps, nous présenterons les actions déjà effectuées en France, ainsi que les résultats obtenus.

Dans la troisième partie, nous décrirons quelques exemples de projet envisagés, par une Industrie Pharmaceutique spécialisée dans la production d'aérosols pharmaceutiques, en vue de réduire son « empreinte carbone ». Pour cela, nous présenterons ces aérosols, ainsi que les intérêts écologiques et économiques des projets de l'Entreprise. Puis, nous nous intéresserons en détail, à un projet visant à optimiser la gestion de gaz propulseur. L'objectif était d'identifier et de corriger, la « cause racine » des écarts existants, entre les stocks informatique et physique de gaz, suspectant alors une perte de celui ci. Ce projet s'intègre à un ensemble d'autres projets, visant à réduire la consommation injustifiée de gaz propulseur, que nous décrirons rapidement par la suite.

1^{ère} partie : Lien entre les gaz à effet de serre émis, par l'activité humaine et le climat.

Depuis une trentaine d'années, le lien entre l'activité humaine et les perturbations du climat est soumis à la controverse. Tout a commencé, lorsque l'analyse des marqueurs biologiques et physiques a révélé quelques résultats inattendus. En effet, c'est dans les années 80, que la communauté scientifique a commencé à prendre réellement conscience d'un changement climatique par rapport au modèle attendu. Dès lors, de nombreuses études scientifiques ont été menées, pour comprendre les raisons de ces changements. Afin de conseiller les politiques mondiales, un Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) a été mandaté en 1988, par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE). Son rôle était de recueillir l'ensemble des études sur l'évolution du climat, et de proposer des solutions à mener. Ce groupe d'experts a produit 4 rapports de synthèse, en 1990, 1995, 2001 et 2007. Chacun de ces rapports est complémentaire des autres, et ensemble ils ont apporté de précieuses mises à jour. Grâce à ces informations, la politique écologique mondiale a pu établir ainsi ses plans d'actions. Celui actuellement en vigueur, ici présenté dans le Traité de Kyoto en 1997, vise essentiellement à faire diminuer les émissions de « gaz à effet de serre » (GES) anthropiques.

Dans un premier temps, les bases de la climatologie seront présentées. Elles seront ensuite suivies du rôle et les origines, des « gaz à effet de serre ».

Grâce à ces informations, nous pourrions comprendre le lien qui paraît de plus en plus exister, entre les perturbations climatiques et les gaz à effet de serre.

Enfin, les prévisions du GIEC concernant l'évolution du climat seront présentées. Elles comprennent l'évolution de la température de la planète, et les conséquences environnementales et socio économiques, qu'elles seraient en mesure d'engendrer.

1 Le climat

Afin de mieux comprendre les débats sur le réchauffement climatique, il nous a paru important, d'étudier le climat de la Planète et ses mécanismes. Nous serons plus à même, de suivre l'évolution du climat aux travers de certains indicateurs.

1.1 La machine climatique

1.1.1 La définition du climat :

Nom masculin (grec klima, -atos, inclinaison) :

« Ensemble des phénomènes météorologiques (température, humidité, ensoleillement, pression, vent, précipitations) qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère en un lieu donné. » (1)

Au travers de la planète, il existe plusieurs climats :

- Le climat polaire,
- Le climat tempéré,
- Les latitudes tempérées chaudes,
- Les climats subtropicaux désertiques,
- Les climats des latitudes intertropicales,
- Etc, ...

Chacun de ces climats est relativement stable en un lieu donné, car de nombreux paramètres naturels maintiennent le système en équilibre. Les principaux paramètres sont les suivants :

- a. L'activité solaire,
- b. Les paramètres astronomiques,
- c. L'effet de serre,
- d. Les activités volcaniques

a. L'activité solaire :

Le Soleil est la source d'énergie principale de la machine climatique. Il émet environ $3,85 \cdot 10^{26} \text{W}$.

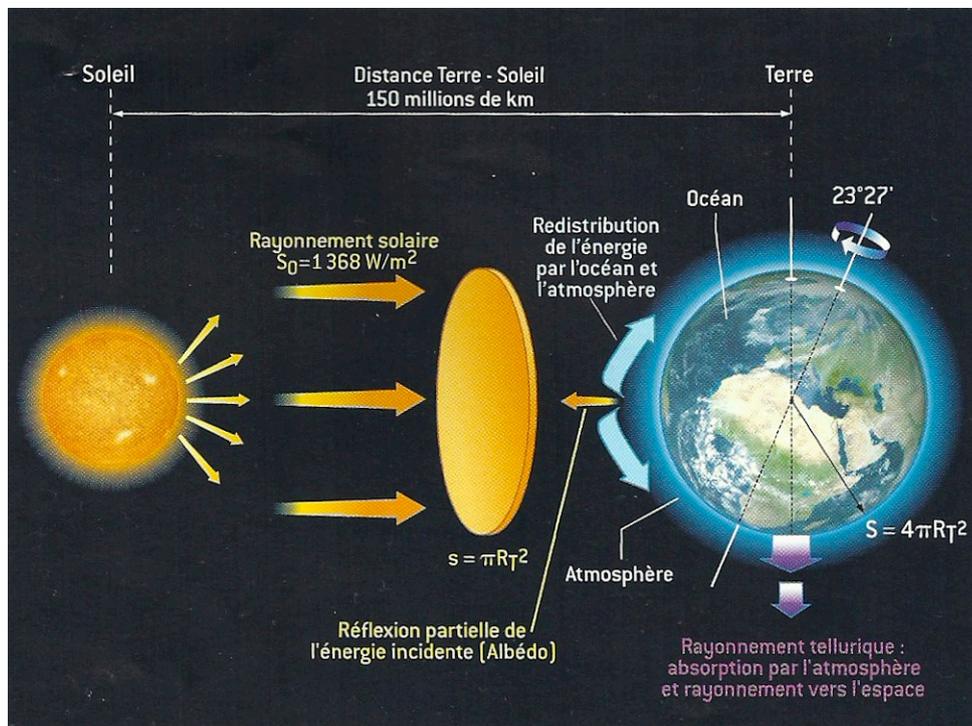


Figure 1. Les principaux mécanismes de l'équilibre climatique de la Terre (2)

Le forçage radiatif (figure 1) :

Au cours des $150 \cdot 10^6$ kilomètres séparant le Soleil de la Terre, l'énergie solaire s'atténue. Lorsque les rayons lumineux arrivent à proximité de l'atmosphère terrestre, le rayonnement solaire n'est plus que de $1368 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Cette valeur est la constante solaire S_0 .

Le disque présent sur la figure 1, représente l'approximation de l'angle des rayons lumineux arrivant sur la Terre. En effet, puisque la distance Soleil – Terre est importante, nous pouvons supposer que les rayons lumineux bombardent uniformément et perpendiculairement la Terre. Cela correspond donc, à la surface d'un disque du même rayon que celui de la Terre : R_T .

Lorsque ces rayons solaires sont à la limite de l'atmosphère, ils se répartissent sur l'ensemble de la Terre. Le rayonnement solaire est alors diminué à $343 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. (3)

b. les paramètres astronomiques :

Les variations naturelles des saisons : Théorie de Milutin Milankovitch ou la théorie astronomique des paléoclimats : (4)

Cette théorie sert à expliquer les cycles du climat, notamment les périodes glaciaires et interglaciaires. Elle a été présentée pour la première fois en 1941. Les principaux paramètres de cette théorie sont les suivants:

- L'excentricité de l'orbite terrestre,
- L'obliquité de la Terre,
- La précession des équinoxes.

L'excentricité orbitale est un paramètre variable. Il correspond à la trajectoire de la Terre autour du Soleil. Sur une période de 100 000 ans, l'orbite passe d'un cercle, à une ellipse d'environ 7% au maximum. La figure 2 représente cette variabilité.

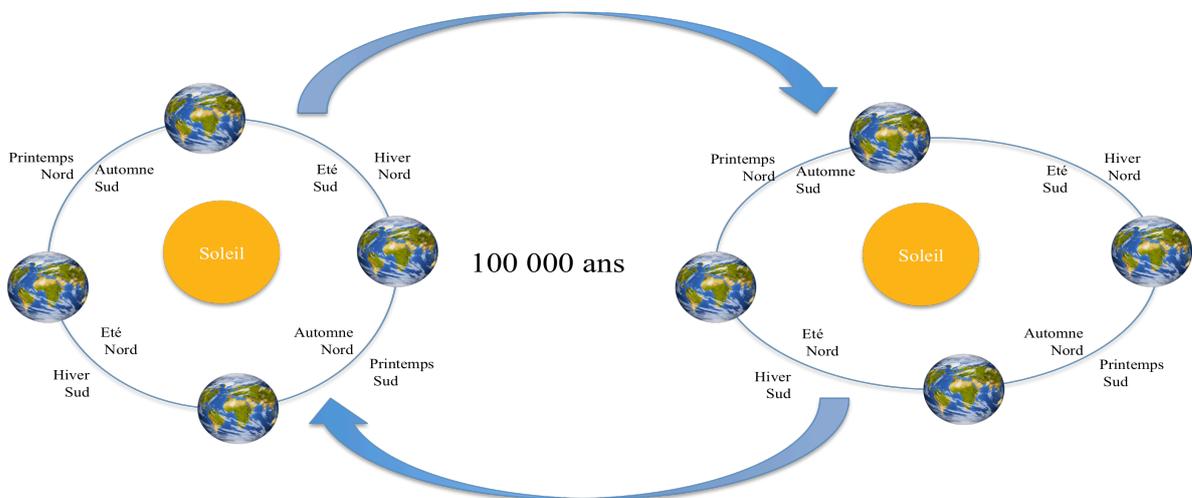


Figure 2. Excentricité de l'orbite terrestre

Plus l'excentricité sera marquée, et plus la disparité des saisons sera constatée.

L'obliquité de la Terre est également variable. Elle est en moyenne autour de $23,3^\circ$. Cependant, elle varie de $21,5^\circ$ à $24,5^\circ$. La variabilité est schématisée sur la figure 3. Ces variations impactent également les saisons. En effet, c'est à cause de l'obliquité de la Terre qu'il existe des saisons. Par conséquent, plus la Terre sera proche de l'axe normal (présenté en rouge sur la figure 3), et moins les saisons seront marquées.

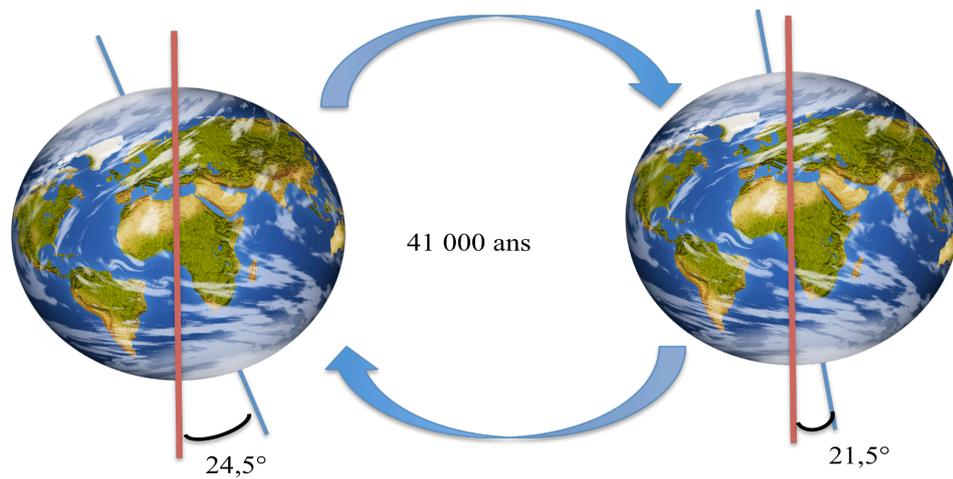


Figure 3. L'obliquité de la Terre

Le dernier paramètre est la précession des équinoxes¹. Il s'agit d'un lent changement de direction, de l'axe de rotation de la Terre. Ce cycle est plus complexe, car de nombreuses interactions participent à sa mécanique (figure 4).

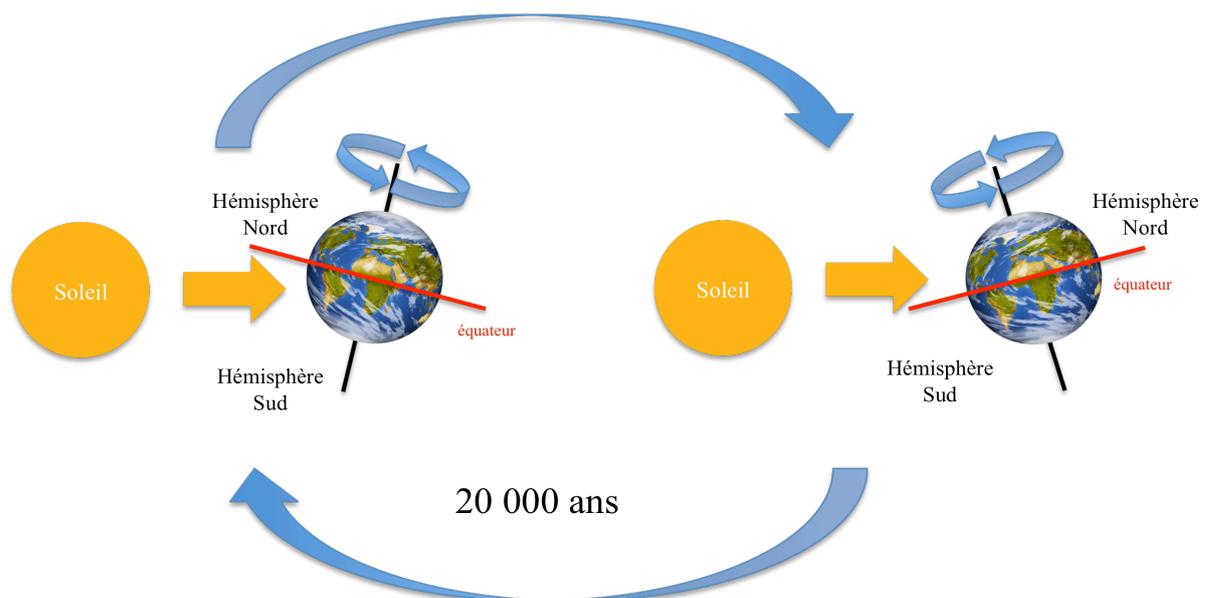


Figure 4. La précession de la Terre à l'équinoxe

La conséquence de la précession est, que l'exposition des hémisphères aux rayons lumineux, s'inverse tous les 20 000 ans.

¹ Epoque de l'année, où la durée du jour est égale à celle à la nuit.

c. L'effet de serre :

L'effet de serre a un rôle important, afin de maintenir une température adéquate à la vie sur Terre. Par exemple, sans elle, la température moyenne de la Terre serait uniquement due aux rayons du Soleil, ce qui correspondrait à -18°C .

L'effet de serre est décrit selon les étapes de la figure 5 : (5)

1. L'énergie vient principalement du Soleil. A son arrivée sur Terre, le rayonnement solaire est de 343 Wm^{-2} .

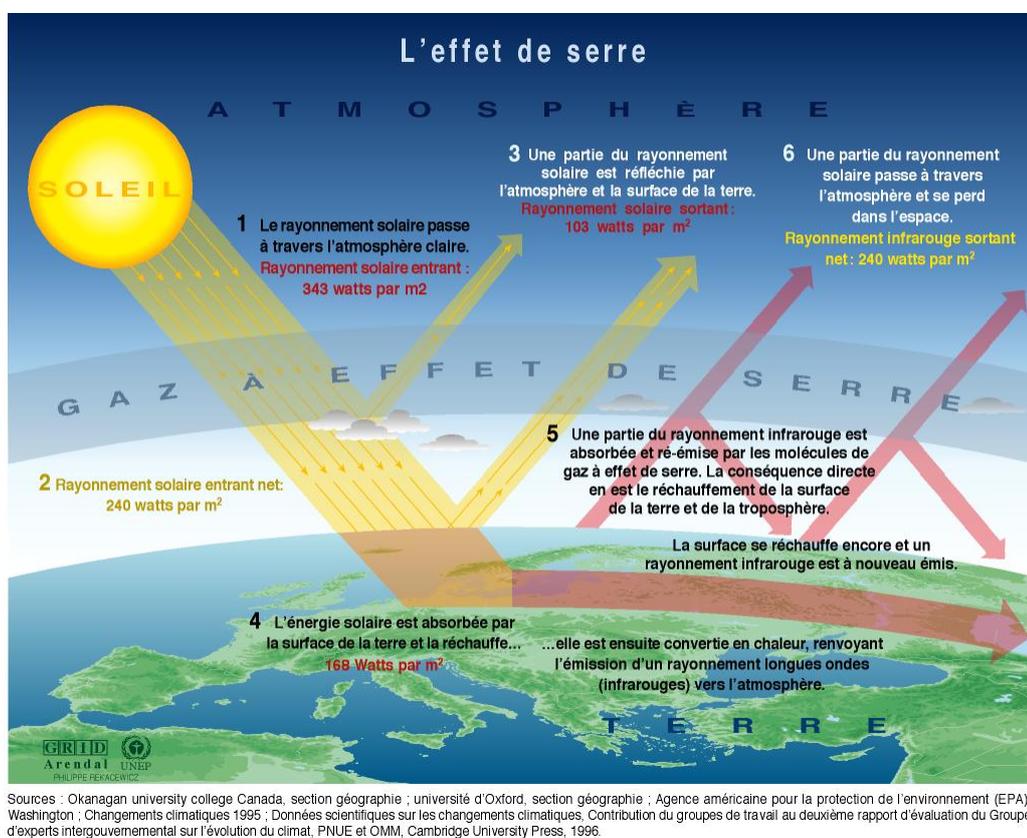


Figure 5. Schéma représentant l'effet de serre sur Terre.

2. Lorsque les rayons lumineux arrivent à notre planète, ils rencontrent une barrière protectrice appelée l'atmosphère. A l'image d'un vernis, elle est assez fine et essentiellement constituée de vapeur d'eau, de dioxyde de carbone, d'ozone, de méthane et de protoxyde d'azote. Au contact de l'atmosphère, les rayons lumineux subissent les premières modifications.

A la suite de celles ci, le rayonnement solaire perd une partie de sa puissance par absorption, réflexion ou diffusion². Il est alors de 240 Wm^{-2} .

3. Les rayons lumineux renvoyés par l'atmosphère, les nuages et la Terre sont chiffrés autour de 100 Wm^{-2} .
4. Les rayons solaires viennent ensuite, bombarder la surface de la Terre (terres, océans et glaces). Une partie de ces rayons est absorbée par la surface, et l'autre est renvoyée vers l'espace. Ce rayonnement est alors dit, tellurique. Ce mécanisme s'appelle le « bilan radiatif terrestre ». Ce bilan est dit « radiatif », car l'énergie est échangée sous forme de rayonnement électromagnétique.
5. Suite au contact de la Terre, les rayons lumineux renvoyés vers l'espace, ont changé de longueurs d'onde. Elles passent du domaine du visible, à celui de l'infrarouge thermique (figure 6). Cette modification rend les rayons renvoyés beaucoup plus absorbables, par les gaz de l'atmosphère. Ce phénomène s'appelle « l'effet de serre naturel » de la Terre, dont l'efficacité dépendant, de la concentration de certains gaz de l'atmosphère, appelés « gaz à effet de serre » (GES).

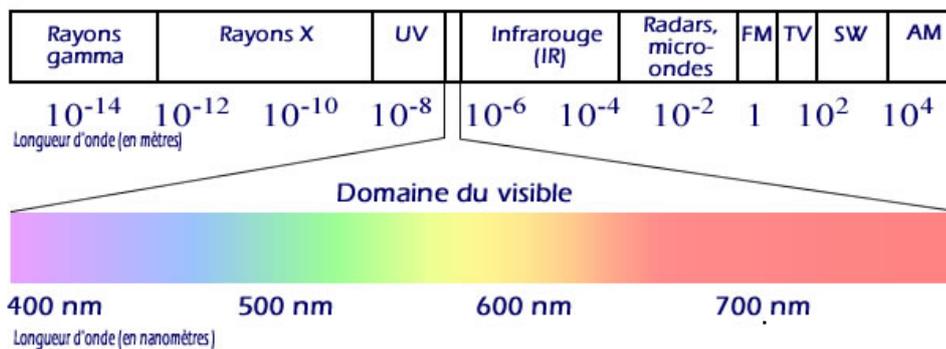


Figure 6. Spectre de longueur d'onde (6)

6. Lorsque le rayonnement tellurique n'est pas absorbé par les gaz de l'atmosphère, il franchit la barrière et se propage dans l'espace.

² Les rayons réfléchis sont renvoyés par une surface dans la même direction, alors que ceux diffusés, sont renvoyés dans toutes les directions. Enfin, les rayons absorbés, le sont de manière sélective, en fonction de leurs longueurs d'onde.

d. L'activité volcanique :

L'activité volcanique influence aussi localement le climat. En effet, lors d'une éruption, de nombreuses poussières sont maintenues en suspension. Ce phénomène rend l'atmosphère plus opaque et diminue l'intensité du rayonnement solaire. Cela est dû aux phénomènes d'absorption, réflexion, diffusion du rayonnement solaire par les poussières. En générale, un refroidissement est constaté jusqu'à la dispersion des poussières volcaniques.

1.2 L'évolution du climat

Ce chapitre a pour objectif, de réunir les informations nécessaires, pour établir un état des lieux de l'évolution du climat.

1.2.1 Les preuves d'un réchauffement climatique

Notre environnement est en pleine mutation. Les données du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), concernant les changements climatiques, sont basées sur de nombreux indicateurs. Les trois principaux sont les suivants :

- Une augmentation de la température globale.
- L'augmentation du niveau des mers.
- La fonte des glaciers, des calottes glaciaires et du recouvrement neigeux des hémisphères.

Ces indicateurs nous permettent de mesurer l'évolution de notre climat. Nous allons donc les détailler successivement, afin de débiter cette étude sur des faits scientifiques.

a. Une augmentation de la température globale (7)

L'augmentation progressive de la température globale de notre planète est le marqueur le plus utilisé par le GIEC. En effet, d'après leur rapport de 2007, la température moyenne aurait augmentée de $0,74^{\circ}\text{C} \pm 24\%^3$ entre 1906 et 2005. Cette évolution semble être de plus en plus élevée chaque année. Pour preuve, entre 1850 et 2007, onze des douze dernières années seraient inscrites, comme les plus chaudes jamais enregistrées. Ces écarts de température seraient généralisés sur toute la planète.

b. L'augmentation du niveau des mers. (7)

Selon le rapport de 2007 du GIEC, celle-ci était de $1,8 \text{ mm/an} \pm 27,7\%^3$ de 1961 à 1993 et elle est, en 2007, de $3,1 \text{ mm/an} \pm 22,6\%^3$. Cette élévation serait due, entre autres, à la fonte des glaciers et des couvertures neigeuses. Cependant, il est difficile d'attribuer cette élévation uniquement à un réchauffement climatique, car de nombreux paramètres tels que la salinité et le vent, peuvent interagir sur les résultats.

c. La fonte des glaciers, des calottes glaciaires et des nappes glaciaires polaires. (7)

L'étendue de neige et de glace a diminué de $2,7\% \pm 22,2\%^3$ par décennie dans l'océan Arctique depuis 1978, date à laquelle son observation quotidienne par satellites est possible. Le recul est plus marqué en Été, avec $7,4\% \pm 32,4\%^3$. L'obliquité actuelle de la Terre exposerait actuellement l'hémisphère Nord. La conséquence est que la fonte des glaces et de la couverture neigeuse, se trouvent accentuées. L'information à retenir de ces chiffres n'est pas que la glace fonde, mais la rapidité avec laquelle elle fond.

Une série de clichés du Glacier Blanc, dans les Alpes françaises, nous permet d'observer, à la fois le recul du glacier et la fonte de la couverture neigeuse :

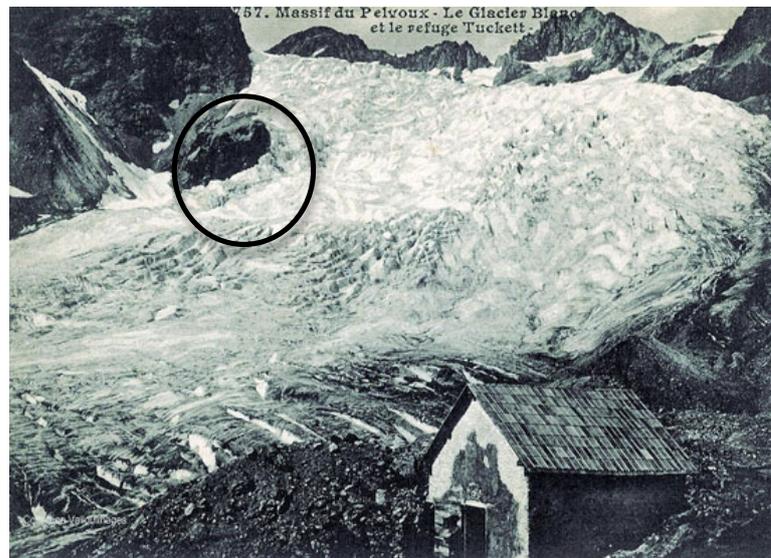


Figure 7. Été 1900 : Carte postale du Glacier Blanc, Massif des Ecrins, 3500m.

La figure 7 est un cliché de 1900. Il nous donne une idée de la quantité de glace initiale.

³ Les incertitudes présentées correspondent à un intervalle de confiance à 90%.

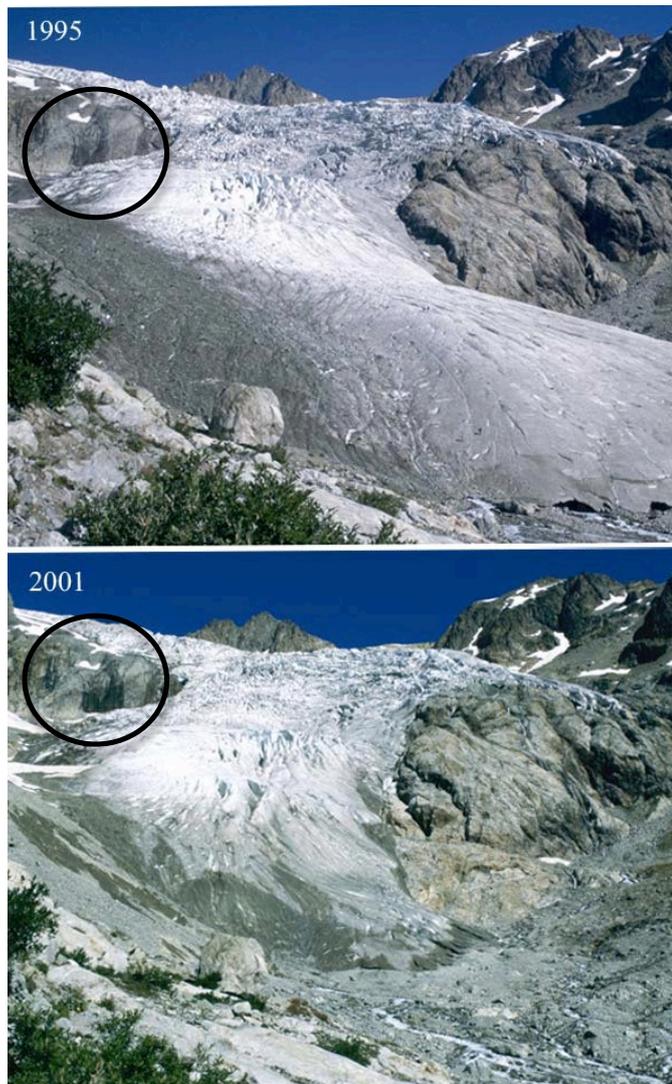


Figure 8. 1995 ; 2001 : Mesures du front du glacier Blanc depuis un point fixe. Photos : Joel Faure, Emmanuel Thibert (8)

La figure 8 montre l'évolution de la quantité de glace et de la couverture neigeuse, 95 et 101 années après. Le cercle représente un point de repère, entre les clichés. Le premier constat visuel est, que le recul du glacier s'est fortement accentué en 5 ans.



Figure 9. Été 2012 : Photographie personnelle du Glacier Blanc, Massif des Ecrins.

La figure 9 est le cliché du Glacier Blanc tel qu'il est aujourd'hui.

Ces quatre clichés, sont assez évocateurs sur le recul du Glacier Blanc dans les Alpes. Ce glacier n'est pas le seul à subir ce recul. Bien d'autres glaciers comme lui à travers le monde, ont suivi la même tendance. A l'image de celui du Kilimandjaro, qui couvrait 13 km² au début du XX^e siècle, et qui n'en couvrait plus qu'1 km² en 2006. Ou encore le glacier Chacaltaya dans les Andes boliviennes, qui s'étalait sur 20 hectares en 1940. Il était descendu à 6 hectares en 2006 (9).

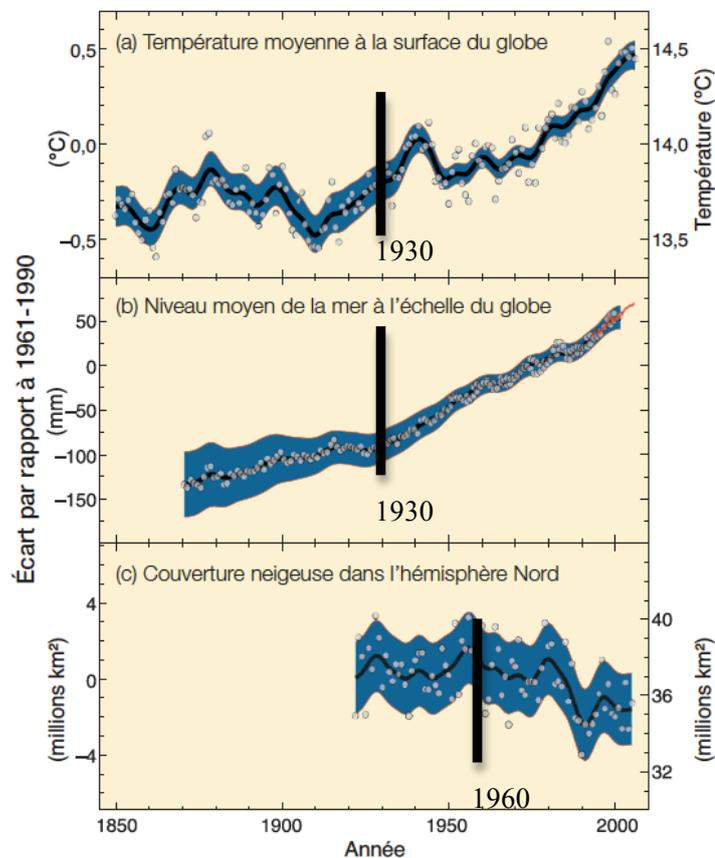


Figure 10. Variations de la température et du niveau de la mer à l'échelle du globe et de la couverture neigeuse dans l'hémisphère Nord. (7).

En juxtaposant, les trois indicateurs sur le même axe de temps (figure 10), nous pouvons identifier les similitudes dans leurs évolutions. A partir de 1930, l'augmentation de la température et celle du niveau des mers, se sont intensifiées. Toutefois, la diminution de la couverture neigeuse de l'hémisphère Nord, ne suit pas la même chronologie. En effet, une accentuation a été enregistrée dans les années 60.

De cette simple observation, il paraît plausible que, le recul des glaciers et de la couverture neigeuse, seraient la conséquence des élévations de la température et du niveau des mers.

Comme cela a été avancé précédemment, ces trois indicateurs ne seraient pas les seuls. Selon le rapport du GIEC de 2007 (7):

« Les observations effectuées sur tous les continents et dans la plupart des océans montrent, qu'une multitude de systèmes naturels sont touchés par les changements climatiques régionaux, en particulier par la hausse des températures. ».

De nombreux écosystèmes seraient donc affectés par ces modifications climatiques. Pour bon nombre d'entre eux, c'est la hausse des températures, qui serait responsable de ces perturbations.

Afin de certifier davantage ces données, il faudrait en connaître aussi leurs origines. Une présentation détaillée de ces informations est exposée dans le point suivant.

1.2.2 Les Origines des données.

Les informations climatiques présentées précédemment sont issues de plusieurs marqueurs.

Ces données sont regroupées dans le tableau 1. Il classe l'origine des données en fonction de leurs périodes de couverture. C'est à dire, l'intervalle de temps pendant lequel, le marqueur peut fournir son information.

Tableau 1. Caractéristiques des archives naturelles (4).

Le marqueur	Résolution temporelle	Période couverte (ans)	Paramètres climatiques dérivés							
			T	H	C	B	V	M	L	S
Les cernes des arbres	An-Saison	10 ⁴	X	X	Air	X	X	X	X	X
Les sédiments lacustres	An	10 ⁴ -10 ⁶	X			X		X		X
Des carottes de glaces polaires	An	10 ⁵	X	X	Air	X	X	X		
Des carottes de glace aux latitudes moyennes	An	10 ³	X	X		X	X			
Des dépôts coralliens	An	10 ⁵	X		Eau	X			X	
Des carottes océaniques	100 ans	10 ⁷	X		Eau	X		X		
Du pollen	1000 ans	10 ⁵	X	X						
Du paléosols	100 ans	10 ⁵	X	X	Sol		X			
Des roches sédimentaires	2 ans	10 ⁷		X	Sol	X	X	X		
Données historiques	Jour-heure	10 ³	X	X		X	X	X	X	X

T : température ; H : humidité ou précipitation ; C : composition chimique ; B : information sur la biomasse ; V : éruptions volcaniques ; M : champ géomagnétique ; L : niveau des mers ; S : activité solaire.

Nous allons reprendre les principaux marqueurs, afin de comprendre comment les données en sont extraites.

a. Les cernes des arbres.

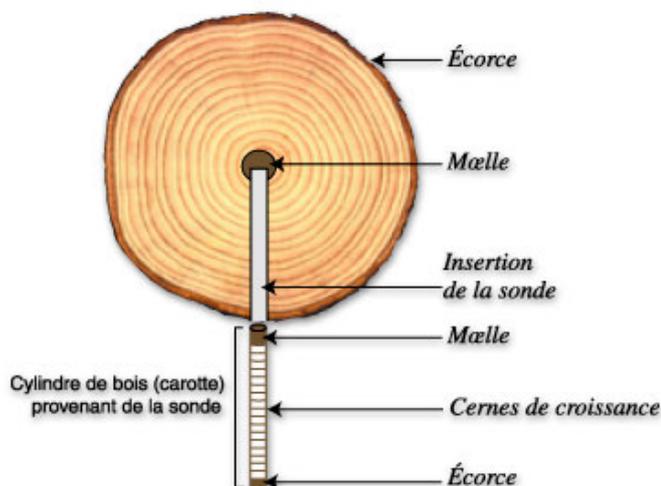


Figure 11. Méthode de recueil des cernes des arbres (10)

Comme indiqué dans le tableau 1, c'est une source d'informations assez complète. La largeur des cernes est la première donnée. Cette largeur dépend : (4)

- De l'humidité du sol,
- De la température,
- Des nutriments,
- D'autres facteurs de croissance.

Dans les régions de hautes latitudes, la largeur des cernes de certains arbres, permettent de déterminer la température estivale (4). Toutefois, cette donnée n'est pas la seule à être intéressante. L'analyse de la cellulose de ces cernes, nous informe également sur la température de l'eau des racines. La méthode pour extraire les cernes des arbres, consiste à prélever une carotte à l'aide d'une sonde. Cette méthode est représentée schématiquement sur la figure 11.

Malheureusement, les espèces capables de nous fournir ces informations sont limitées aux zones tempérées, voire tropicales. Les cernes des arbres apportent un grand nombre d'informations, mais sont à compléter par d'autres marqueurs.

b. L'étude des sédiments en général. (4)

Cette étude regroupe l'ensemble des sédiments lacustres et des roches sédimentaires. Selon le tableau 1, ces sources sont très riches d'informations. Etant donné que, le processus de géomorphologie dépend directement des conditions environnementales, de nombreuses informations sont apportées sur :

- Le changement hydrique et biologique,
- La variation des niveaux des mers,
- Le déplacement de la croûte terrestre lié à l'activité volcanique,
- Le paléosol⁴
- La glaciation et la déglaciation,
- L'évolution de la tectonique des plaques.

⁴ « Sol ancien formé dans des conditions de climat et de végétation différentes de l'actuel et [...] ayant évolué au cours du quaternaire et du tertiaire... », Larousse.

Ces informations complètent alors celles des cernes des arbres dans les régions, où ils sont absents ou inexploitable.

c. Les carottes de glace des régions polaires. (4)

Il s'agit de la seule source d'informations pour la région polaire. En effet, la glace renferme des bulles d'air, qui sont ensuite analysées. Elles ont permis de révéler l'évolution de la quantité de gaz à effet de serre au cours de notre aire glaciaire, sur les 150 000 dernières années. Grâce aux techniques modernes, ces données sont extrêmement précises. Elles permettent également de connaître, les précipitations neigeuses aux hautes latitudes.

d. Les documents historiques. (4)

Ceux-ci sont extraits des échanges commerciaux, de la production agricole et des vendanges. Réunis, ils forment une importante base de données permettant de décrire l'évolution de ces 500 dernières années.

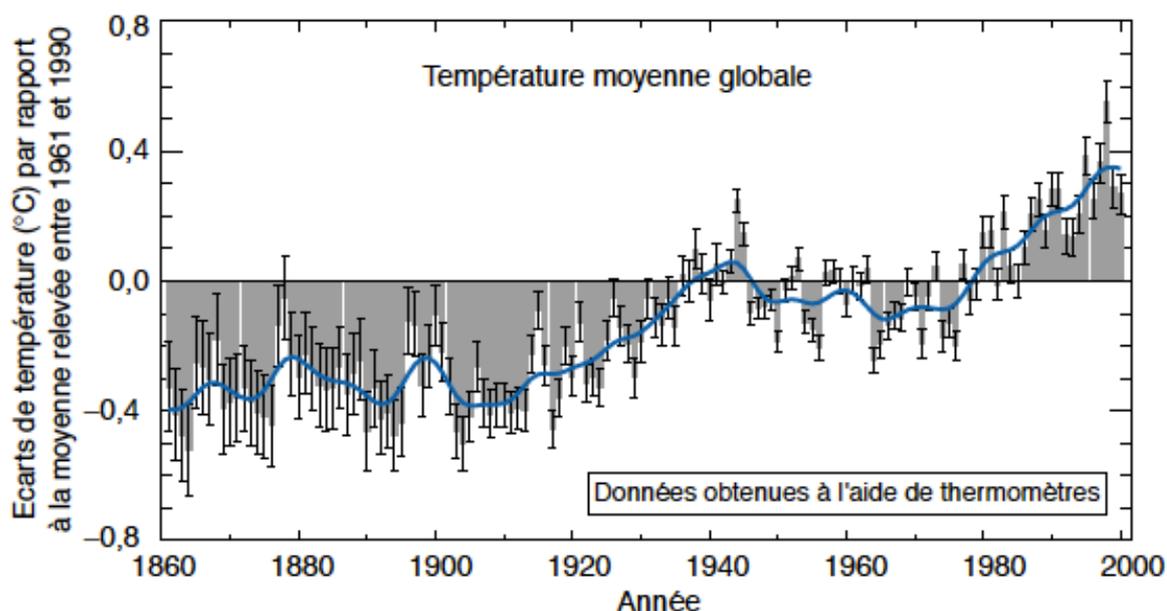


Figure 12. Variations de la température à la surface de la Terre, au cours des 140 dernières années. (11)

La figure 12 montre l'évolution des températures décrites dans les documents historiques.

Toutes ces informations nous fournissent les bases en Climatologie et de suivi de l'évolution climatique. Maintenant nous pourrions nous intéresser, plus particulièrement, aux « gaz à effet de serre ».

2 Les gaz à effet de serre

Les gaz à effet de serre sont au cœur de la Politique Ecologique actuelle. Ce chapitre a pour objectif de comprendre leur rôle et d'identifier leurs origines.

2.1 Les gaz à effet de serre (GES)

Définition :

« Gaz dont la présence dans l'atmosphère contribue à l'effet de serre. » (1)

Les gaz sont définis en fonction de l'effet de serre qu'ils produisent. Le nom « effet de serre » est une image due au fait, que l'atmosphère agit comme « une vitre ». Elle laisse passer le rayonnement solaire, mais réabsorbe une partie du rayonnement tellurique.

Le mécanisme de l'effet de serre ayant été décrit dans le point précédent, nous nous concentrerons maintenant sur les caractéristiques des GES.

1. La composition de l'atmosphère en gaz à effet de serre (GES).

Les principaux gaz qui composent l'atmosphère sont :

- Le dioxyde de carbone (CO₂),
- La vapeur d'eau (H₂O),
- L'ozone (O₃),
- Le méthane (CH₄),
- L'oxyde nitreux (N₂O),
- Les dérivés fluorés (CFC, HFC, PFC).

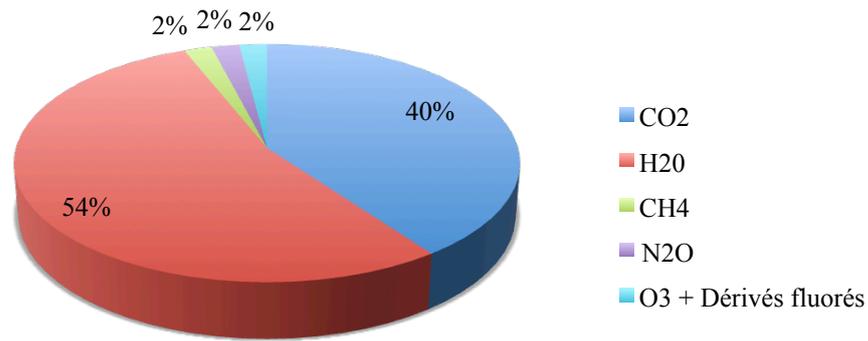


Figure 13. Répartition des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. (2)

Les teneurs les plus représentatives en gaz à effet de serre, sont celles de la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone (figure 13). La teneur de la vapeur d'eau dans la composition de l'atmosphère, est assez difficile à définir. Sa variabilité due aux changements d'état physique, fait fluctuer sa concentration. De son côté, la teneur du CO₂ est extrêmement stable. Par conséquent, c'est elle qui sert d'indicateur, lors des études sur la concentration des gaz à effet de serre.

2. L'importance de l'effet de serre : Les atmosphères de Venus et de Mars. (2)

Avant de commencer la description des autres atmosphères, nous pouvons nous rappeler que si la Terre n'avait pas son atmosphère, elle serait à -18°C. Or la température moyenne de la Terre est à 15°C. Les 33°C supplémentaires viennent donc, de l'effet de serre de la Terre. Au travers des atmosphères de Venus et de Mars, nous verrons l'utilité et les limites de l'effet de serre.

Vénus, Mars et la Terre ont des teneurs en gaz à effet de serre relativement différentes, et se distinguent par leurs distances par rapport au Soleil.

Le cas de Mars.

Des trois planètes, Mars est la plus éloignée du Soleil. La conséquence est qu'elle possède un champ de gravitation plus faible, et donc une masse inférieure aux autres.

Avec son atmosphère représentant 0,76% de celle de la Terre, sa température de surface est de -53°C. Si l'eau était présente, elle serait sous forme de glace à cette température. Cela signifie que l'atmosphère de Mars serait essentiellement constituée de CO₂. Malgré sa présence, l'effet de serre n'est pas assez efficace pour réchauffer cette planète.

Le cas de Venus.

Venus est tout à fait à l'opposé de Mars. Il s'agit de la planète la plus proche du Soleil. La conséquence est, que sa masse est plus imposante. Son atmosphère est quant à elle, très riche en gaz à effet de serre. Cela lui permet d'avoir une température de 474°C à sa surface. Elle est largement supérieure à celle de l'équilibre, qui est de - 42°C. A 474°C, l'ensemble des substances volatiles est à l'état gazeux. Tous les gaz participent donc, à l'effet de serre et contribuent au maintien de la température de surface. L'effet de serre serait extrêmement important sur Vénus.

Tableau 2. Récapitulatif des effets de serre (2)

Planète	Température sans atmosphère	Température avec atmosphère	Etat physique de l'eau	Compatibilité avec la vie.
Vénus	- 42°C	474°C	Gazeux	NON
Terre	- 18°C	15°C	Gazeux, liquide et solide	OUI
Mars	- 60 °C	- 53°C	Solide	NON

Les effets de serre de Mars et Venus montrent leurs limites. Ce qui est important à retenir, c'est que la présence d'eau à l'état liquide dépend de cet effet de serre. Sur les trois planètes, seule la Terre est capable de maintenir en équilibre les trois états physique de l'eau et donc, de permettre la vie (tableau 2).

2.2 L'origine naturelle

La plupart des gaz présents dans l'atmosphère sont d'origine naturelle et/ou anthropique. En revanche, certains gaz font exception, tels que les dérivés fluorés, car ils sont uniquement issus de l'activité humaine.

Le tableau 3 regroupe les principales origines naturelles des GES. (12)

Tableau 3. Les origines naturelles des GES (12)

GES	Origines naturelles
Le dioxyde de carbone (CO₂)	Nombreuses : éruptions volcaniques ; respirations des plantes, des animaux, des humains ; incendies naturels, décomposition des plantes, etc...
Les vapeurs d'eau (H₂O)	Changement d'état de l'eau vers l'état gazeux
L'ozone (O₃)	Dissociation des molécules d'oxygène par le rayonnement solaire.
Le méthane (CH₄)	Marécages, termites, océans, combustion de matières carbonées fossiles
L'oxyde nitreux (N₂O)	Sols des forêts tropicales

2.3 L'origine anthropique (liée à l'activité humaine)

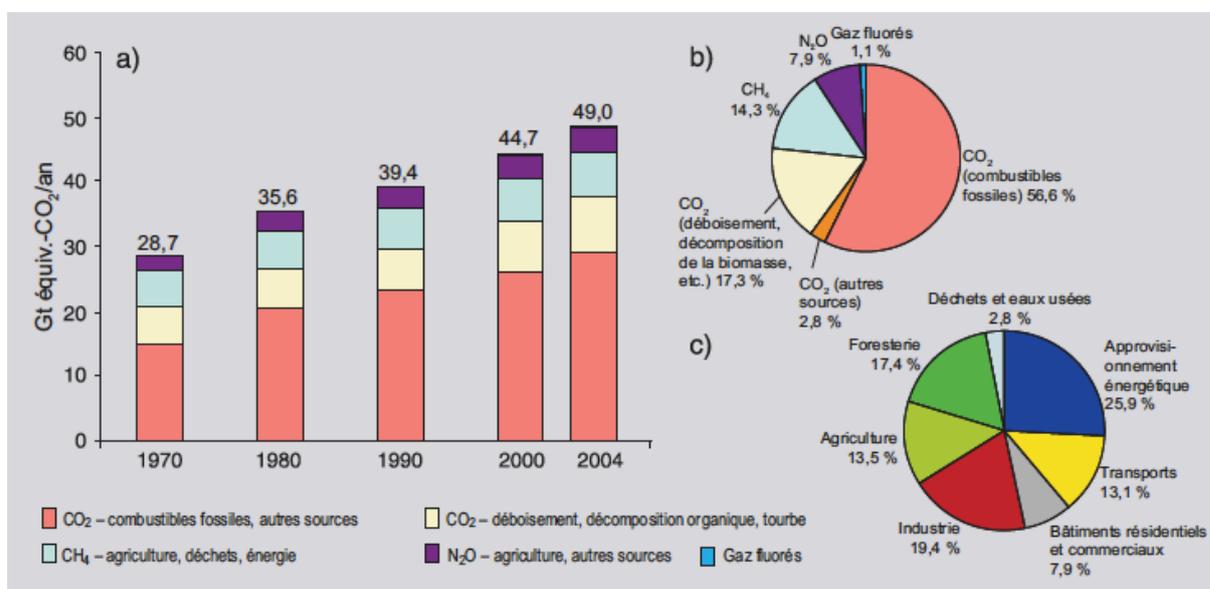


Figure 14. Emissions mondiales de gaz à effet de serre anthropiques, de 1970 à 2004 (7)

La figure 14 regroupe les origines des GES anthropiques à l'échelle mondiale, au cours des 30 dernières années (7). Les constats sont les suivants :

- Une augmentation de 70% des émissions en 30 ans,
- le CO₂ représente 76,7% des émissions anthropiques,
- Tous les secteurs participeraient aux émissions mondiales.

Avec l'ensemble de ces informations, nous avons déjà une idée un peu plus précise, sur la nature, l'utilité et l'origine des gaz à effet de serre. Nous verrons par la suite, quel est le lien entre les GES et les perturbations du climat.

3 Le lien entre le climat et les gaz à effet de serre

Tous les « gaz à effet de serre » (GES) n'ont pas la même efficacité, sur l'effet de serre. Afin de pouvoir les comparer, le CO₂ a été pris comme référence. On parle d'équivalent CO₂ (équiv-CO₂).

L'efficacité de chaque GES est appelée : le Pouvoir de Réchauffement Global (PRG).

La méthode utilisée afin de définir le PRG, est de mesurer le pouvoir d'absorption du rayonnement, dont la longueur d'onde est située dans l'infrarouge thermique (correspondant au rayonnement tellurique). Quelques exemples de PRG sont regroupés dans le tableau 4.

Tableau 4. PRG en fonction des GES (13)

Composés	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SF ₆
PRG (équiv-CO ₂)	1	21	310	23 900

3.1 Les perturbations climatiques et l'augmentation des émissions de GES

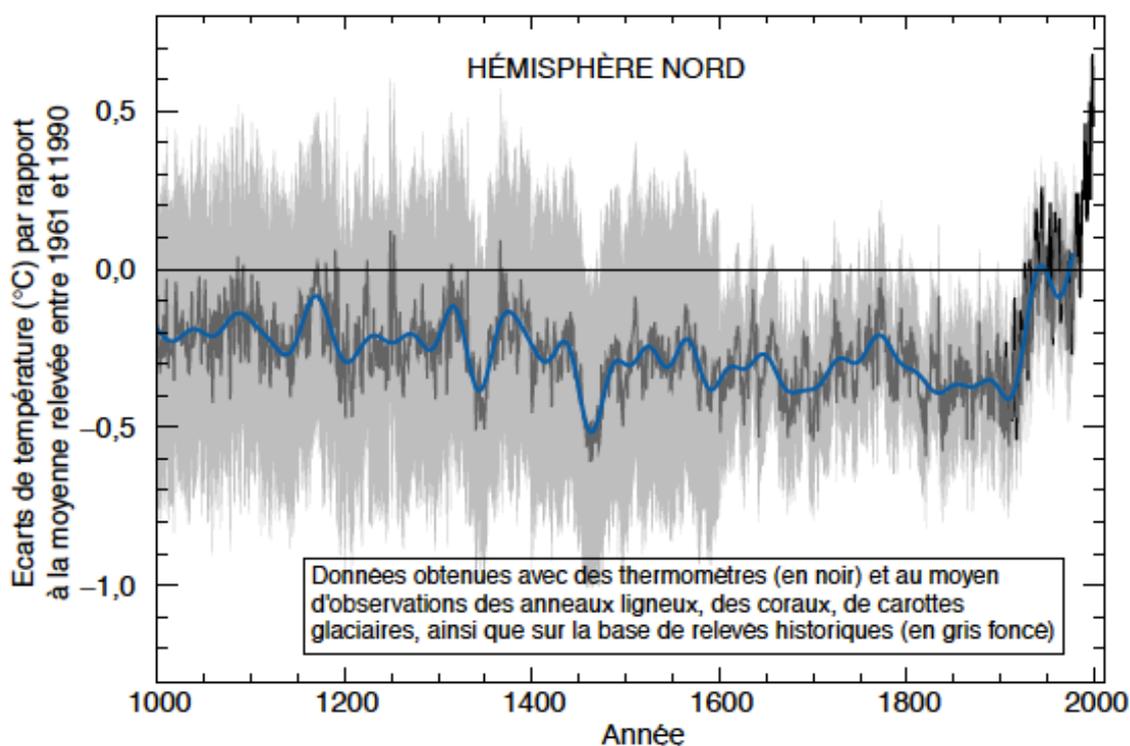


Figure 15. Variations de la température à la surface de la Terre, au cours des 1000 dernières années. (11)

La figure 15 reprend les variations des températures, depuis ces 1000 dernières années. Lorsque la ligne est inférieure à zéro, c'est que les températures mesurées sont inférieures à la valeur moyenne de 1961 et 1990. Cette valeur moyenne sert de référence.

Le constat est que la température augmente de manière brutale depuis 1900.

Pour voir, s'il existe un lien avec les GES anthropiques, nous allons analyser le CO₂ et CH₄, qui sont les plus représentatifs.

a. Le CO₂ : (11)

Les relevés de 1998 montreraient, que la quantité en CO₂ atmosphérique actuelle, n'aurait jamais été dépassée, au cours des 420 000 dernières années. Les incertitudes sont assez importantes, car les données atmosphériques du CO₂ sont difficiles à interpréter. En effet, elles dépendent de nombreux autres phénomènes naturels.

Cependant, les modèles construits pour mesurer le CO₂ mondial, ont été confirmés par les analyses des bulles d'air présentes, dans les carottes de glace.

Ces mêmes bulles d'air montreraient le lien, entre les variations en concentrations de CO₂ et les variations de température sur Terre (figure 16).

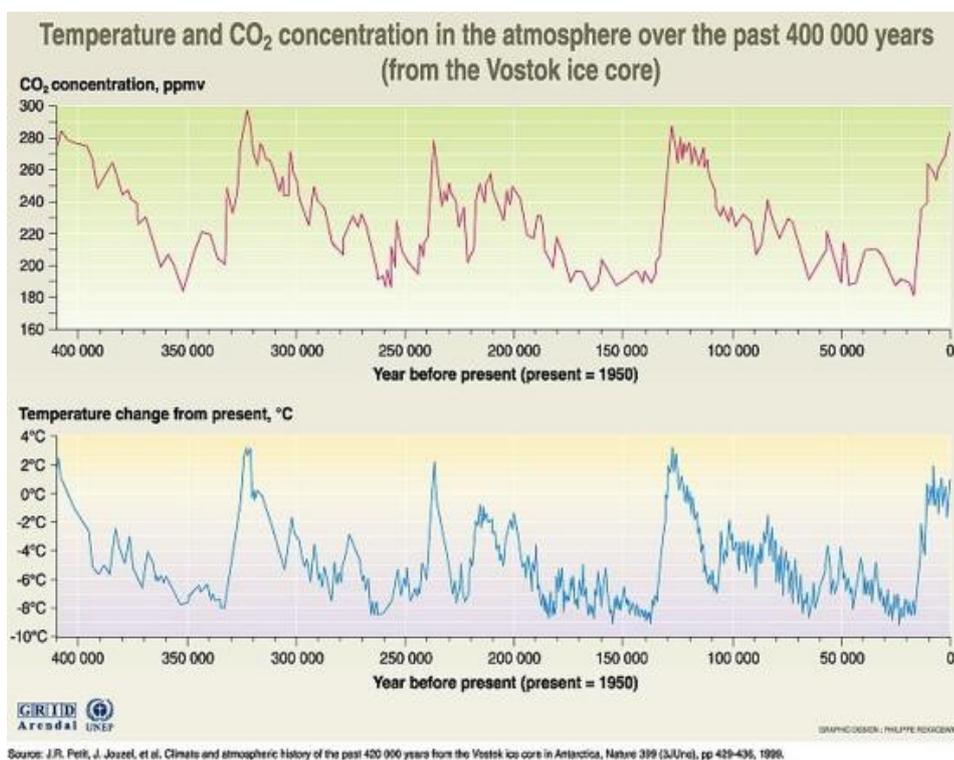


Figure 16. Teneur en CO₂ des carottes glaciaires antarctiques. (14)

Ces données confirment donc le lien entre le CO₂ et les variations climatiques mondiales.

b. Le CH₄ : (11)

Les relevés du CH₄ ont commencé en 1983. Pour les données antérieures, elles proviennent des bulles d'air des carottes glaciaires.

Sur l'échelle du temps, le GIEC constate que les émissions de CH₄ sont en progression non constante. C'est à dire que, depuis ces 25 dernières années, les émissions continuent d'augmenter, mais à un rythme moins élevé (figure 17). La raison de ce ralentissement n'est pas encore tout à fait identifiée.

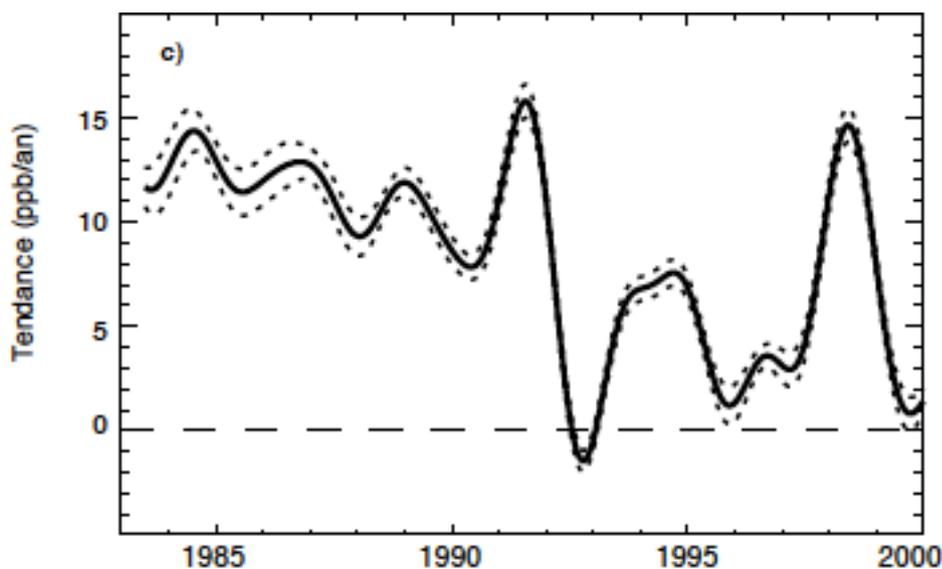


Figure 17. Taux instantané de croissance annuelle (ppb/an) de la teneur atmosphérique mondiale en CH₄, de 1983 à 1999

Le CH₄ augmente parallèlement à l'accroissement des températures. Cependant, son évolution n'étant pas encore tout à fait comprise, nous ne pouvons donc pas lier de façon certaine, l'évolution du CH₄ aux perturbations climatiques.

c. Les autres GES :

Tableau 5. GES soumis à l'influence humaine (11)

	CO ₂ (Dioxyde de carbone)	CH ₄ (Méthane)	N ₂ O (Oxyde nitreux)	CFC-11 (Chlorofluoro- carbone-11)	HFC-23 (Hydrofluoro- carbone-23)	CF ₄ (Perfluoro méthane)
Concentration pré-industrielle	environ 280 ppm	environ 700 ppb	environ 270 ppb	zéro	zéro	40 ppt
Concentration en 1998	365 ppm	1745 ppb	314 ppb	268 ppt	14 ppt	80 ppt
Changement du taux de concentration	1,5 ppm/an ^d	7,0 ppb/an ^d	0,8 ppb/an	-1,4 ppt/an	0,55 ppt/an	1 ppt/an
Temps de séjour atmosphérique	ans ^a	12 ans ^b	114 ans ^b	45 ans	260 ans	>50,000 ans

^a Aucun temps de séjour unique ne peut être déterminé pour le CO₂ en raison des différents taux d'absorption des divers processus d'élimination.
^b Ce temps de séjour a été défini comme un "temps d'ajustement" qui tient compte de l'effet indirect du gaz sur son propre temps de séjour.
^c Taux calculé pour la période 1990-1999.
^d Le taux a fluctué entre 0,9 ppm/an et 2,8 ppm/an pour le CO₂ et entre 0 et 13 ppb/an pour le CH₄ durant la période 1990-1999

Les évolutions des GES sont regroupées dans le tableau 5.

A la suite de ces informations, il est possible d'en conclure, qu'il existe un lien évident entre l'émission de GES et l'augmentation de la température sur Terre. Ce lien serait l'augmentation des teneurs en gaz à effet de serre dans l'atmosphère, et l'élévation de la température de surface de la Terre.

A l'heure actuelle, il est donc important d'anticiper les conséquences de ces changements. Pour cela le GIEC a proposé un certain nombre de projections pour les années à venir.

3.2 Les projections

Le but des projections est d'anticiper les évolutions des émissions de GES, pour les prochaines années. Pour cela, les projections du GIEC se sont basées sur quelques hypothèses à forte probabilité :

- Une augmentation de la démographie,
- Une augmentation de l'exploitation des sols,
- Un progrès technologique,
- Une augmentation en approvisionnement énergétique.

Grâce à elles, plusieurs scénarios ont été établis, en faisant varier l'importance des hypothèses entre elles.

Les scénarios de type A : (11)

Ils sont basés sur une croissance des modèles d'activité, de consommation et de technologies, qui sont très proches des modèles actuels.

Un scénario A1, qui se décline en 3 variantes :

- A1FI : Axé sur l'utilisation intensive d'énergie fossile,
- A1B : Axé sur un modèle équilibré en consommation d'énergie et en utilisation de technologie,
- A1T : Axé sur l'utilisation de technologie avec peu d'utilisation d'énergie fossile.

Un scénario A2 : Axé sur une faible croissance démographique et une forte consommation d'énergie fossile.

Les scénarios de type B : (11)

Ils sont basés sur le changement des structures d'activité, avec l'émergence d'une économie de service.

Ces structures d'activité requièrent un faible contenu, en matière première et en énergie. Ce modèle est marqué par la diffusion de nouvelles technologies, et la recherche de la viabilité des modes de développement.

Un scénario B1 : Axé sur un niveau de croissance élevé, et d'une diminution de la moitié des émissions de CO₂ cumulées d'ici 2100.

Un scénario B2 : Axé sur une croissance de la démographie mondiale plus faible (rythme inférieur à A2), avec un développement économique et technologique moins rapide, mais plus diversifié.

Les résultats (figure 18) : (7)

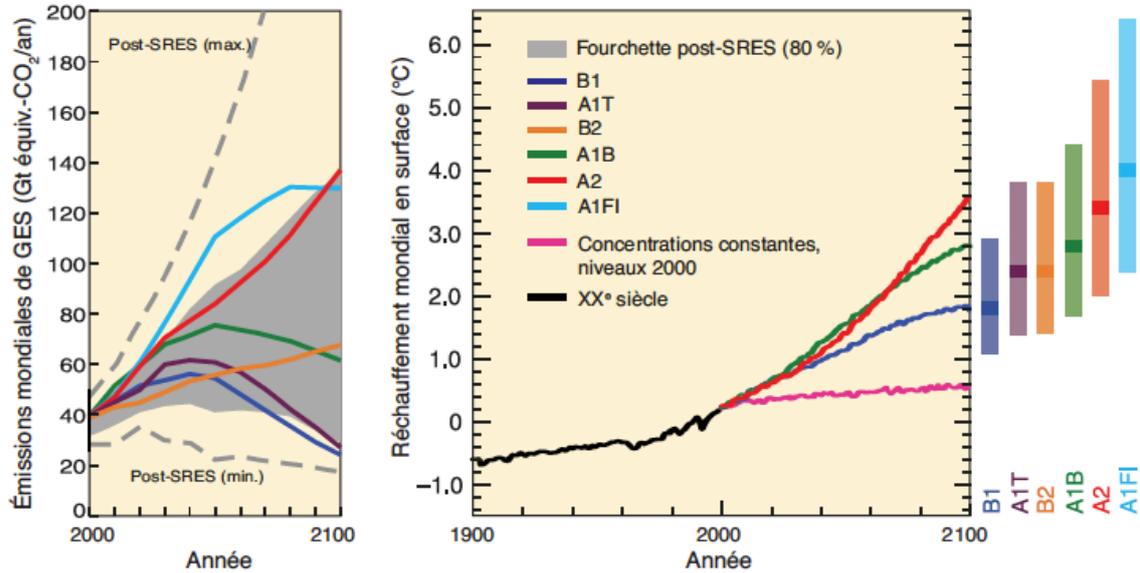


Figure 18. Scénarios d'émissions de GES pour la période 2000-2100 (en l'absence de politiques climatiques additionnelles), et projections relatives aux températures en surface

Etant donné qu'il s'agit de prévisions, ces résultats sont à débattre, avant de déterminer les choix et les actions correctrices, qu'elles pourraient permettre.

Dans tous les scénarios, le réchauffement mondial augmente. En revanche, ce qui change, c'est la rapidité à laquelle il augmente. De tous les scénarios, le B1 semble donner les meilleurs résultats. Il consisterait à conserver un niveau de croissance élevé, tout en diminuant les émissions de CO₂ cumulées de moitié d'ici 2100.

Ce scénario pourrait alors, servir à orienter les politiques environnementales.

Ces projections permettraient également au GIEC, d'anticiper les conséquences environnementales et socioéconomiques qui pourraient en découler.

4 Les conséquences attendues des perturbations climatiques

Les conséquences attendues donnent du poids aux politiques écologiques. Elles sont donc importantes, afin de se préparer aux changements prévisibles, sur le plan environnemental et socio-économique.

4.1 Les conséquences environnementales

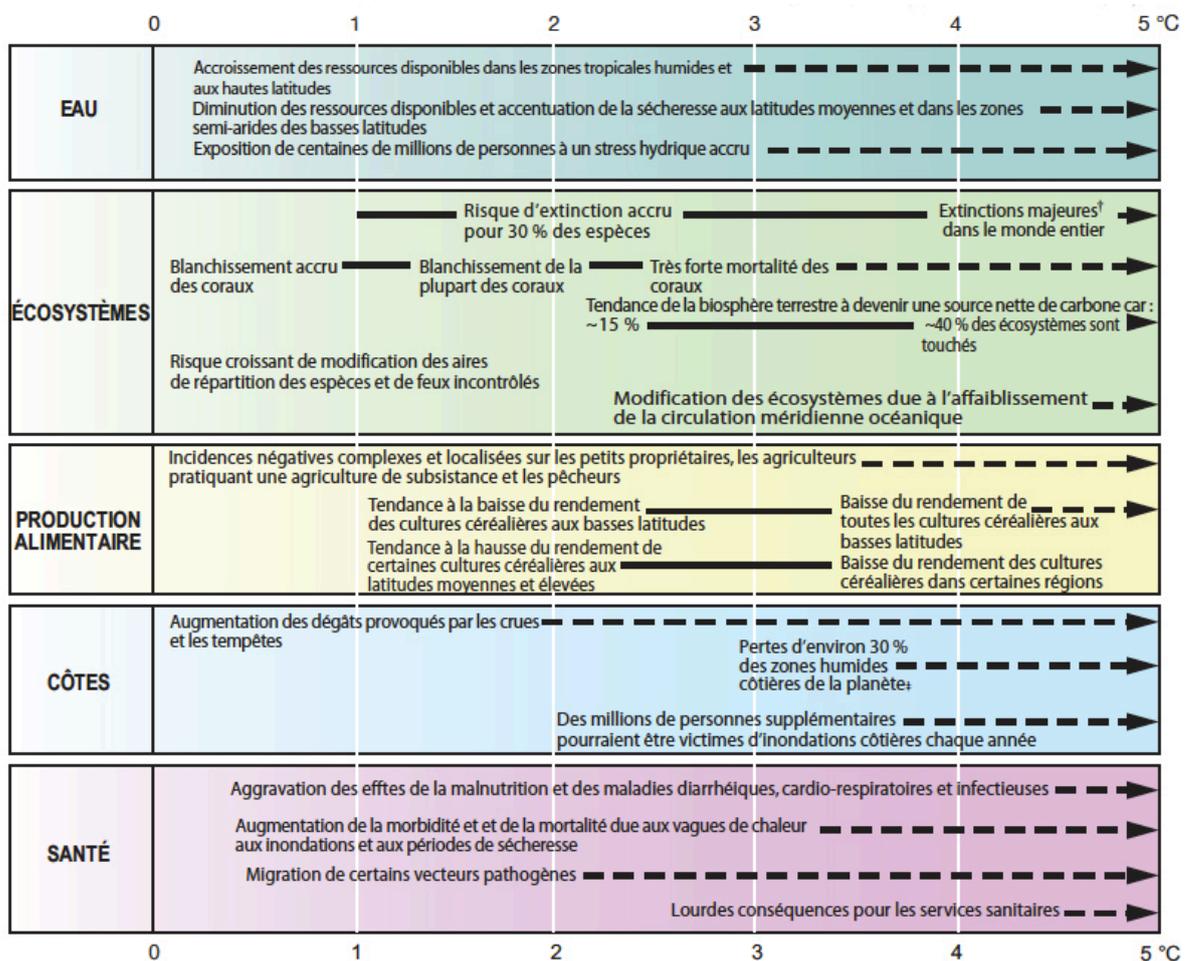


Figure 19. Exemples d'incidences associées à la variation de la température moyenne à la surface du globe (7)

Les conséquences environnementales des perturbations climatiques sont réunies dans la figure 19. Il ne faut cependant pas oublier, que ces conséquences envisagées ont une incertitude importante, mais servent à l'orientation des politiques environnementales mondiales.

Dans la plupart des cas, ces prévisions des conséquences, ne semblent pas apporter de bénéfice à l'environnement.

4.2 Les conséquences socio-économiques

Tableau 6. Les conséquences socio-économiques des changements climatiques anticipés (7)

<p>Afrique</p>	<ul style="list-style-type: none"> • D'ici 2020, 75 à 250 millions de personnes devraient souffrir d'un stress hydrique accentué par les changements climatiques. • Dans certains pays, le rendement de l'agriculture pluviale pourrait chuter de 50 % d'ici 2020. On anticipe que la production agricole et l'accès à la nourriture seront durement touchés dans de nombreux pays, avec de lourdes conséquences en matière de sécurité alimentaire et de malnutrition. • Vers la fin du XXI^e siècle, l'élévation anticipée du niveau de la mer affectera les basses terres littorales fortement peuplées. Le coût de l'adaptation pourrait représenter 5 à 10 % du produit intérieur brut, voire plus. • Selon plusieurs scénarios climatiques, la superficie des terres arides et semi-arides pourrait augmenter de 5 à 8 % d'ici à 2080.
<p>Asie</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Les quantités d'eau douce disponibles devraient diminuer d'ici les années 2050 dans le centre, le sud, l'est et le sud-est de l'Asie, en particulier dans les grands bassins fluviaux. • Les zones côtières, surtout les régions très peuplées des grands deltas de l'Asie du Sud, de l'Est et du Sud-Est, seront exposées à des risques accrus d'inondation marine et, dans certains grands deltas, d'inondation fluviale. • Les changements climatiques devraient amplifier les pressions que l'urbanisation rapide, l'industrialisation et le développement économique exercent sur les ressources naturelles et l'environnement. • Les modifications du cycle hydrologique devraient entraîner, dans l'est, le sud et le sud-est de l'Asie, une hausse de la morbidité et de la mortalité endémiques dues aux maladies diarrhéiques qui accompagnent les crues et la sécheresse.
<p>Australie et Nouvelle Zélande</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Certains sites d'une grande richesse écologique, dont la Grande Barrière de corail et les « Wet Tropics » (tropiques humides) du Queensland, devraient subir une perte importante de biodiversité d'ici 2020. • D'ici 2030, les problèmes d'approvisionnement en eau devraient s'intensifier dans l'est et le sud de l'Australie ainsi que dans le Northland et certaines régions orientales de la Nouvelle-Zélande. • D'ici 2030, la production agricole et forestière devrait décroître dans une bonne partie du sud et de l'est de l'Australie ainsi que dans plusieurs régions orientales de la Nouvelle-Zélande, en raison de l'accentuation de la sécheresse et de la fréquence accrue des incendies. Au début toutefois, les changements climatiques devraient se révéler bénéfiques dans d'autres secteurs de la Nouvelle-Zélande. • D'ici 2050, dans certaines régions de l'Australie et de la Nouvelle-Zélande, l'aménagement progressif du littoral et la croissance démographique devraient accroître les risques liés à l'élévation du niveau de la mer et à l'augmentation de l'intensité et de la fréquence des tempêtes et des inondations côtières.

Europe	<ul style="list-style-type: none"> • Nous nous attendons, à ce que les changements climatiques amplifient les disparités régionales en matière de ressources naturelles et de moyens économiques. Au nombre des incidences négatives figurent un risque croissant d'inondations éclair à l'intérieur des terres, une plus grande fréquence des inondations côtières et une érosion accrue (attribuable aux tempêtes et à l'élévation du niveau de la mer). • Les régions montagneuses devront faire face au recul des glaciers, à la réduction de la couverture neigeuse et du tourisme hivernal ainsi qu'à la disparition de nombreuses espèces (jusqu'à 60 % d'ici 2080 dans certaines régions, selon les scénarios de fortes émissions). • Dans le sud de l'Europe, région déjà vulnérable à la variabilité du climat, les changements climatiques devraient aggraver la situation (températures élevées et sécheresse) et nuire à l'approvisionnement en eau, au potentiel hydroélectrique, au tourisme estival et, en général, aux rendements agricoles. • Les risques sanitaires liés aux vagues de chaleur et à la fréquence accrue des incendies devraient être amplifiés par les changements climatiques.
Amérique latine	<ul style="list-style-type: none"> • D'ici le milieu du siècle, les forêts tropicales devraient être progressivement remplacées par la savane dans l'est de l'Amazonie sous l'effet de la hausse des températures et du dessèchement des sols. La végétation de type semi-aride aura tendance à laisser place à une végétation de type aride. • La disparition de certaines espèces risque d'appauvrir énormément la diversité biologique dans de nombreuses régions tropicales de l'Amérique latine. • Le rendement de certaines cultures importantes et de l'élevage du bétail devrait diminuer, au détriment de la sécurité alimentaire. On anticipe en revanche une augmentation du rendement des cultures de soja dans les zones tempérées. • La modification des régimes de précipitations et la disparition des glaciers devraient réduire considérablement les ressources en eau disponibles pour la consommation humaine, l'agriculture et la production d'énergie.
Amérique du Nord	<ul style="list-style-type: none"> • Selon les projections, le réchauffement du climat dans les régions montagneuses de l'ouest du continent diminuera l'enneigement, augmentera la fréquence des inondations hivernales et réduira les débits estivaux, avivant la concurrence pour des ressources en eau déjà surexploitées. • L'évolution modérée du climat au cours des premières décennies du siècle devrait accroître de 5 à 20 % le rendement des cultures pluviales, mais avec de nets écarts d'une région à l'autre. De graves difficultés risquent de surgir dans le cas des cultures déjà exposées à des températures proches de la limite supérieure de leur plage de tolérance ou qui dépendent de ressources en eau déjà fortement utilisées. • Au cours du siècle, les villes qui subissent actuellement des vagues de chaleur devraient faire face à une hausse du nombre, de l'intensité et de la durée de ces phénomènes, ce qui pourrait avoir des incidences défavorables pour la santé. • Dans les régions côtières, les établissements humains et les habitats naturels subiront des pressions accrues [...]

Régions polaires	<ul style="list-style-type: none"> • Les principales répercussions biophysiques attendues sont la réduction de l'épaisseur et de l'étendue des glaciers, des nappes glaciaires et des glaces de mer ainsi que la modification des écosystèmes naturels au détriment de nombreux organismes, dont les oiseaux migrateurs, les mammifères et les grands prédateurs. • Pour les communautés de l'Arctique, les effets devraient être mitigés, notamment ceux qui résulteront de l'évolution de l'état de la neige et de la glace. • Les éléments d'infrastructure et les modes de vie traditionnels des populations autochtones seront touchés. • On estime que les écosystèmes et les habitats propres aux régions polaires de l'Arctique et de l'Antarctique seront fragilisés, du fait de l'atténuation des obstacles climatiques à l'invasion de nouvelles espèces.
Petites îles	<ul style="list-style-type: none"> • Selon les prévisions, l'élévation du niveau de la mer devrait intensifier les inondations, les ondes de tempête, l'érosion et d'autres phénomènes côtiers dangereux, menaçant l'infrastructure, les établissements humains et les installations vitales pour les populations insulaires. • La détérioration de l'état des zones côtières, par exemple l'érosion des plages et le blanchissement des coraux, devrait porter atteinte aux ressources locales. • D'ici le milieu du siècle, les changements climatiques devraient réduire les ressources en eau dans de nombreuses petites îles, par exemple dans les Caraïbes et le Pacifique, à tel point que la demande ne pourra plus être satisfaite pendant les périodes de faible pluviosité. • La hausse des températures devrait favoriser l'invasion d'espèces exotiques, notamment aux moyennes et hautes latitudes.

Cet important tableau 6 regroupe l'ensemble prévisions du GIEC, concernant les conséquences socio-économiques des changements climatiques.

Ces prévisions font office de cartographie probable sur le plan socio-économique, pour les prochaines années. Comme les conséquences environnementales, elles ne semblent pas apporter de bénéfice à la société.

Au travers de cette première partie : « Lien entre les gaz à effet de serre émis par l'activité humaine et le climat », nous avons pu découvrir rapidement les bases de la climatologie, mais aussi, les origines et l'utilité des « gaz à effet de serre ».

Toutes ses généralités nous ont permis de constater, le lien entre le climat et les émissions de gaz à effet de serre, et plus particulièrement, le rôle des gaz à effet de serre anthropiques, dans l'augmentation et la rapidité du réchauffement climatique de la planète.

A partir des dernières constatations climatiques, le GIEC a émis des projections pour l'avenir de notre système, s'il continuait à évoluer tel qu'aujourd'hui. A la suite de leurs études, les projections montreraient un impact délétère, à la fois sur la planète, mais aussi sur l'ensemble du système socio-économique mondial.

Par conséquent, nous pouvons plus facilement et mieux comprendre, l'importance des actions préconisées et menées par toutes les politiques environnementales mondiales, contre les émissions de gaz à effet de serre anthropiques.

La seconde partie nous permettra maintenant, de présenter les actions environnementales déjà entreprises et leurs impacts à venir, sur le monde industriel.

2^{ème} partie : Les actions contre le réchauffement climatique anthropique.

Les informations scientifiques recueillies dans la partie précédente, sont marquées par de fortes incertitudes. Il est malheureusement impossible, de les occulter. C'est à partir de 1988, que la communauté scientifique a informé pour la première fois, les pouvoirs politiques, sur les dangers qu'un réchauffement climatique pourrait engendrer.

Les politiques ont alors, mis en place des actions, visant à lutter contre ce réchauffement climatique. La problématique étant de pouvoir faire les bons choix, sachant qu'il s'agissait d'un débat, qui a fait l'objet de controverse.

Par exemple, l'opinion scientifique du début du XX^{ème} siècle, affirmait de manière quasi unanime, un refroidissement de la Planète. A l'époque, leur avis était d'intensifier l'effet de serre.

De plus, étant donné l'état « critique » de la situation actuelle, une politique environnementale serait efficace, à condition qu'elle soit acceptée par tous. Pour cela, elle doit s'accorder avec les contraintes économiques et la croissance de chacun des Pays.

Pour ces raisons, il est difficile de prendre des décisions pour la collectivité, uniquement fondées sur les avis de la communauté scientifique. C'est ce que nous allons approfondir lors de cette deuxième partie : « les actions contre le réchauffement climatique ».

Nous verrons, au travers de la chronologie des actions environnementales, que la mise en place d'accords n'est pas une entreprise aisée.

Nous verrons également, en détail, le Protocole de Kyôto et les résultats mondiaux.

Enfin, nous étudierons le cas particulier de la France, ainsi que ses résultats.

1 La politique écologique internationale

1.1 Chronologie de la politique écologique mondiale

1896, Stockholm : (15)

Svante Arrhenius est le premier à émettre l'hypothèse, que la combustion du charbon engendrerait une augmentation de la quantité de gaz carbonique (CO₂) dans l'atmosphère. Il avait également prédit un réchauffement planétaire d'environ 5°C.

1957, Mauna Loa, Hawaï : (16) (17)

Dans le cadre de l'année géophysique internationale, et sous l'impulsion de Roger Revelle, Charles Keeling commence la mesure systématique de la concentration atmosphérique du CO₂; elle était alors de 315 ppm en 1959. Elle dépassera 331 ppm en 1975, 354 ppm en 1990, 391 ppm en 2011.

1979, Genève : (18)

Première Conférence mondiale sur le climat, qui a débouché sur la création du Programme climatologique mondial de l'OMM.

1987, Montréal : (19)

Traité visant, entre autres, à diminuer les émissions de CFC, responsable de la dégradation de la couche d'ozone.

1988 : (7)

Création du GIEC, Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.

1990, Genève : (20)

Publication du premier rapport du GIEC. Il confirme les informations scientifiques à l'origine des préoccupations sur le climat et, surtout, incite l'ONU à organiser l'évènement "Sommet de la Terre".

1992, Rio de Janeiro : (21)

Tenue du "Sommet de la Terre" et négociation de la Convention-cadre des Nations Unies, sur le changement climatique (UNFCCC).

1995 : (5)

Le deuxième rapport du GIEC conclut, que les activités humaines ont une influence discernable sur le climat.

1997, Kyôto : (22)

Signature du Protocole de Kyôto (à la Convention-cadre UNFCCC), définissant des objectifs chiffrés de réduction des émissions de « gaz à effet de serre ».

1998, Buenos Aires : (23)

4^{ème} Conférence des Parties, où les plans d'actions du Protocole de Kyôto ont été définis. Les pays industrialisés ont négocié un engagement des pays en développement.

1999, Grenoble, Gif sur Yvette, Moscou : (4)

Publication des résultats de l'analyse de la carotte de glace de Vostok (Antarctique), révélant la corrélation entre les variations de climat, celles des concentrations de CO₂, et de méthane depuis 420 000 ans.

2000, La Haye : (24)

6^{ème} Conférence des Parties, où l'accord sur les plans d'actions et des mesures adoptées à Kyôto, n'a pu être conclu. La principale cause du désaccord, concerne la prise en compte des puits naturels de carbone⁵.

⁵ Les puits naturels de carbone correspondent à une dégradation du CO₂ par les terrains naturels. Par exemple, les forêts en pleine expansion consomment une grande quantité de CO₂. Lorsqu'elles atteignent leur phase mature, la quantité de CO₂ est moindre et donc, les quantité de CO₂ atmosphériques augmentent.

2001, Washington : (25)

L'administration Bush des Etats Unis refuse de ratifier le Protocole de Kyôto, et demande l'avis de l'Académie des Sciences des Etats Unis, sur la question du réchauffement climatique. L'Académie confirme ultérieurement, le sérieux des rapports du GIEC sur la question.

2001 : (11)

Selon le troisième rapport du GIEC, le réchauffement planétaire se situerait entre 1,4 et 5,5°C, en l'an 2100. La valeur exacte dépendrait alors, des "scénarios" politico-économiques d'émissions de gaz à effet de serre, comme de la sensibilité physique du climat.

2001, Bonn et Marrakech : (26)

Au terme des négociations de Bonn en juillet 2001, et de Marrakech en novembre 2001, les parties ont trouvé un accord aux négociations. Elles ont permis ainsi, la ratification du Protocole de Kyôto par un grand nombre de Parties.

2002, New Delhi : (27)

La 8^{ème} conférence des Parties a servi de première réunion au Protocole de Kyôto. Au terme des premiers résultats, la conférence conclut à une plus grande implication des Etats, dans la mise en place de technologies nécessaires aux énergies renouvelables.

2005 : (28)

Le Protocole de Kyôto entre en vigueur. Au moins 55 des Parties, qui comptaient en 1990, un total d'au moins 55 % des émissions de CO₂, ont déposé leurs instruments de ratification, d'acceptation, d'approbation ou d'adhésion⁶.

2005, Montréal : (29)

Discussions sur la politique de réduction d'émissions, pour la suite de la période définie par le Protocole de Kyôto (1990-2012). Participation des Etats Unis dans le cadre de l'UNFCCC.

⁶ Les instruments de ratification, d'acceptation, d'approbation ou d'adhésion sont des lettres officielles, qui établissent le consentement d'un Etat, à être lié par le traité.

2006, Londres : (30)

Rapport de Nicolas Stern sur les conséquences économiques du changement climatique. Ce rapport souligne la gravité des risques économiques, si aucune action à l'échelle mondiale pour réduire rapidement les émissions de gaz à effet de serre, n'est réalisée. Selon lui, les bénéfices d'une telle action, dépasseraient nettement les coûts de l'investissement.

2007, Paris, Bruxelles, Bangkok, Valence : (7)

Finalisation du quatrième rapport du GIEC. Le rapport réajuste ses projections, sur les conséquences environnementales et socio économiques, grâce aux données actualisées sur l'évolution du climat.

2009 : (31)

184 pays ont ratifié, ou accepté, ou approuvé, le Protocole de Kyôto.

2009, Copenhague : (32)

Sommet mondial sur les mesures à adopter, pour les pays développés, mais aussi pour les pays « en développement », afin d'éviter « la zone de danger », annoncée dans le quatrième rapport du GIEC.

2010, Cancun : (33)

16^{ème} conférence des Parties, où le « Fonds Vert climat » a été créé, en réponse à la crise économique. En revanche, aucun accord n'a pu être conclu entre les Parties, sur les actions envisagées à Copenhague.

2011, Durban : (34)

Lors de la 17^{ème} conférence des Parties, une feuille de route a été définie, afin de mettre en place, le cadre juridique des futures actions d'ici 2015. La décision de prolonger les accords de Kyoto a également été adoptée.

2011, Montréal : (35)

Le Canada se retire officiellement de son engagement au Protocole de Kyôto, du fait que les deux plus importants émetteurs de CO₂, ne participent pas activement dans ce Protocole.

Au travers de cette chronologie, nous nous apercevons que les actions environnementales internationales, ne sembleraient pas aisées à adopter. Nous allons nous focaliser sur l'accord de Kyôto, qui est actuellement, le seul véritable accord international pour la lutte contre le réchauffement climatique.

1.2 Le Traité de Kyôto

Le Traité de Kyôto est le premier véritable Accord International, dans la lutte contre le réchauffement climatique anthropique. Effectivement, des objectifs quantitatifs ont été définis pour chaque pays participant au Traité, ainsi que des mesures de « sanctions », dans le cas où ils ne seraient pas atteints. Les caractéristiques du Protocole seront décrites selon :

- Sa création,
- Sa controverse,
- Sa flexibilité,
- Son mécanisme d'observance.

a. La création :

Le Traité de Kyôto a été établi lors de la Conférence des Parties réalisée en 1997. Une première édition du « Protocole de Kyôto » fut soumise à l'ensemble des pays de la Planète.

En 1998, 84 pays avaient déjà apposé leur signature au Protocole. Mais en 2001, les Etats Unis du gouvernement Bush, ont refusé de ratifier le Protocole, prétextant qu'il désavantageait leur croissance, ainsi que leur économie.

Mis à part ce refus, le Protocole a été finalisé lors de la Conférence de Bonn et Marrakech en 2001. Il entra en vigueur en 2005, à la suite de la ratification de l'Union Européenne et de la Russie. A cette date, le nombre de pays ayant ratifié le Traité, était d'au moins 55 pays industrialisés (présents à l'annexe A).

b. La controverse :

Ce Traité s'est retrouvé, à de nombreuses reprises, au centre de la controverse. Les nombreux points de désaccord entre les pays, ont malheureusement discrédité cette action d'envergure internationale.

Pour commencer, le contexte scientifique de 1997 amenait de nombreux débats, lors des premiers constats du GIEC. A cette époque, le deuxième rapport annonçait un réchauffement climatique, et supposait fortement le rôle de l'activité humaine dans son évolution. Pour de nombreux scientifiques, ces données n'étaient pas statistiquement recevables. Pour cause, quelques études apportaient à l'époque, des conclusions différentes. Une pétition contre le Protocole de Kyôto a été signée par 31 000 scientifiques américains, appelée « *Oregon petition* » (36), du nom du journal scientifique « *Oregon Institute of Science and Medicine* ». Il était donc difficile pour les politiques nationales, de prendre des décisions pouvant, dans un premier temps, engager d'importants investissements.

La première des Parties refusant le Protocole sont les Etats Unis d'Amérique, premier émetteur de gaz à effet de serre (GES) à l'époque (figure 20). Etant le pays le plus durement affecté par ce Traité, il fit intervenir l'Académie des Sciences des Etats Unis, afin de déterminer le « bien fondé » des informations du GIEC (25). Postérieurement, l'Académie a donné raison aux constatations du GIEC.

Cependant, les Etats Unis n'ont pas ratifié le Traité pour autant. Un autre point de désaccord majeur, était : la répartition des émissions mondiales par quota.

Etant le plus important émetteur de CO₂ de la Planète en 1990, une réduction de leurs émissions aurait entraîné, un réel ralentissement de leur croissance, affectant aussi leur économie. De plus, le Protocole ne s'appliquait pas aux pays « en développement », afin de ne pas ralentir leur croissance. La République Populaire de Chine, second émetteur mondial de gaz à effet de serre à l'époque, était donc exempté d'exigences environnementales. Face à cette « injustice », les Etats Unis d'Amérique n'ont jamais ratifié le Protocole, mais se sont néanmoins engagés, dans l'élaboration de nouvelles technologies, moins polluantes.

D'autres pays, tels que l'Australie ou la Russie ont négocié leurs quotas d'émissions de GES avant de ratifier le Traité.

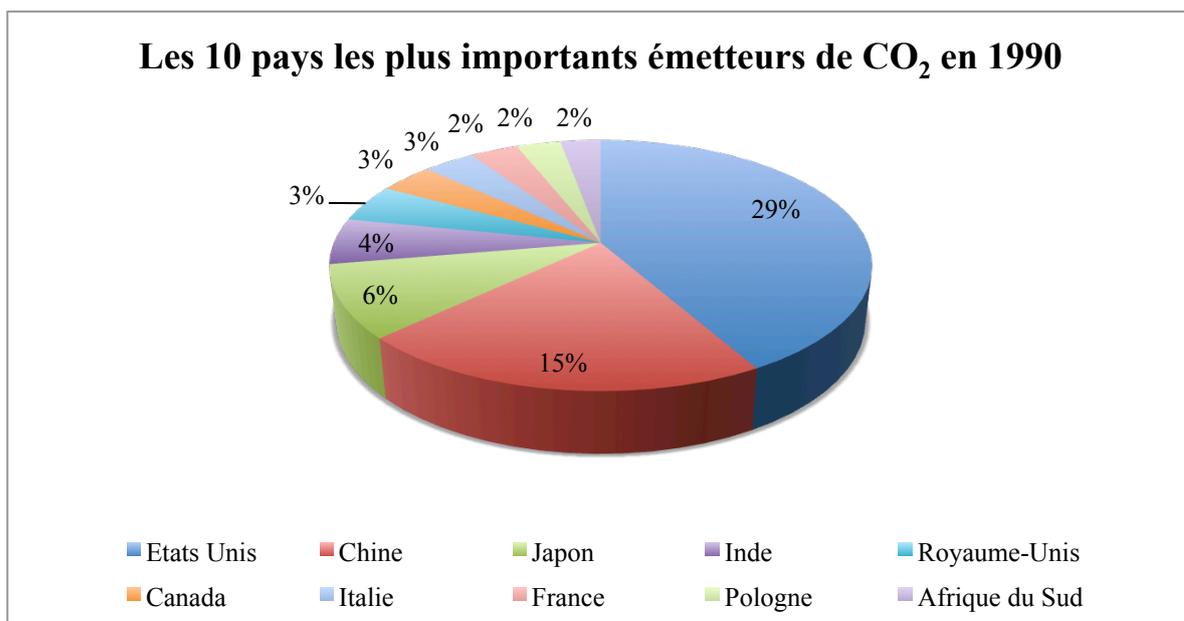


Figure 20. Les 10 pays les plus gros émetteurs de CO₂ en pourcentage, par rapport aux émissions mondiales en 1990 (37)

c. Les objectifs : (38)

Les objectifs de ce Traité sont clairs. Les pays ayant ratifié le Protocole doivent, réduire ou maintenir leurs émissions de GES, par rapport à leurs émissions de 1990. Chaque pays a eu l'opportunité, de négocier le quota d'émissions de GES, qu'il devrait atteindre en 2012. Le tableau 7 regroupe les données de CO₂ de 1990 et les objectifs de chaque pays.

Tableau 7. Emissions de gaz carbonique exprimées en millions de tonnes (Mt). (39)

Pays ou groupements	Emission de CO ₂				
	1990		Evolution 1990-1994 (%)	Objectif pour 2012	
	Total (Mt/an)	Par habitant (t/an)		Réclamé (%)	Protocole de Kyôto (%)
Union Européenne	3300	9,7	-1	-15	- 8
Allemagne	1014	12,8	-9		- 8
Espagne	227	5,8	+14		- 8
France	367	6,5	-4		- 8
Grèce	82	8,2	+7		- 8
Italie	429	7,5	-1		- 8
Portugal	42	4,0	+49		- 8
Royaume-Uni	577	10,1	-4		- 8
Suède	61	6,7	+7		- 8
Autres pays européens	2,2	8,5	-4		+ 10
Norvège	25	8,4	+9		+ 1
Suisse	45	6,7	-5		- 8
Pays T.E.M	4800		-29		
Russie	2330	16,1	-26	0	0
Hongrie	72	6,8	-15		- 6
Pologne	465	10,9			- 6
République tchèque	166	16,0	-23		- 8
Juscanz	6807				
Japon	1060	9,4	+8	- 5	- 6
Etats-Unis	4970	19,8	+7	0	-7
Canada	463	17,4	+9	0	-6
Australie	289	16,9	+8	+ 18	+ 8
Nouvelles Zélande	25	7,6	+16		0
Chine	2400	2,2	+30		
Autres P.V.D	4100	1,8	+25		
Monde	22000	4,2	+6		

Les pays « en Transition vers une Economie de Marché » (T.E.M) sont les pays de l'ancien bloc soviétique.

Comme cela a été énoncé précédemment, les pays « en développement », et quelques pays en « transition vers une économie de marché » (TEM), sont exemptés d'exigences sur leurs émissions de GES. Cette dérogation a été réalisée dans l'unique but, de ne pas ralentir leurs développements économiques.

d. La flexibilité : (40)

Outre les programmes internes, visant à une réduction des GES de chaque pays, le Protocole de Kyôto prévoit des alternatives, appelées mécanismes de flexibilité, aux articles 6, 12 et 17. Ces mécanismes sont les suivants :

- L'application conjointe,
- Le mécanisme pour un développement propre,
- Le commerce international des droits d'émission.

L'application conjointe :

Ce mécanisme consiste à réaliser un projet de réduction de GES, commun entre deux pays. L'intérêt de celui-ci, est de pouvoir transférer une partie des droits d'émission, du pays où est réalisé le projet, vers le pays investisseur. Afin de pouvoir utiliser ce mécanisme, les pays participants doivent être obligatoirement industrialisés.

Le mécanisme pour un développement propre :

Ce mécanisme met en jeu les pays « en développement », non couverts par les exigences de réduction des émissions de GES. Son fonctionnement est semblable à l'application conjointe, mise à part, la création des droits d'émission au crédit du pays collaborateur. De plus, aucune justification n'est demandée aux pays « en développement » sur leurs actions.

Le commerce international des droits d'émission :

Il s'agit du mécanisme le plus simple. Lorsqu'un pays n'émet pas l'intégralité de son quota d'émission de GES, il peut « vendre » ceux inutilisés. Un marché est alors créé autour des droits d'émission.

Ces mécanismes de flexibilité permettent aux participants, de les aider à répondre à leurs objectifs, grâce à des projets de protection du climat à l'étranger, mais aussi, grâce aux échanges de droit d'émissions.

e. Le mécanisme d'observance : (41)

Ce mécanisme est basé sur un système de contrôle novateur, pour une action internationale écologique. Pour la première fois, des sanctions ont été définies, pour un non-respect du Protocole de Kyôto. Ce mécanisme dit « dur », a créé une nouvelle vague de polémiques. Ce système de contrôle imposant des sanctions, pourrait décourager certaines Parties à s'engager dans ce Protocole.

Compte tenu des aspects économiques du Protocole, il est nécessaire de réguler les abus, ainsi que le commerce des droits d'émission de CO₂, par un système de contrôle.

Ce mécanisme n'est toutefois, pas prioritairement autoritaire. Lorsqu'une non-conformité est constatée, il prévoit des mesures visant à gérer cette non-conformité, avec :

- « a) Une analyse des motifs du non-respect ;*
- b) Un exposé des mesures qu'elle entend prendre pour remédier à la situation ;*
- c) Un calendrier d'application de ces mesures dans un délai maximal de 12 mois qui permet de mesurer les progrès réalisés dans l'exécution » (41)*

1.3 Les résultats actuels

Les résultats sont représentés dans les figures 21, 22 et 23. Elles ont été réalisées, grâce aux données officielles recueillies par les Nations Unies.

La figure 21 nous informe de l'évolution en 2009, des 4 plus gros émetteurs de CO₂ de 1990.

- La République Populaire de Chine voit ses émissions de CO₂ augmenter de manière plus marquée, depuis 2002. En 2005, elle devient le premier émetteur de CO₂ mondial, et conserve sa position.
- Les Etats Unis ont également connu une augmentation de leurs émissions, mais dans une moindre mesure.
- Le Japon semble avoir pu maintenir ses émissions depuis 1990.
- Enfin, l'Inde a vu également, ses émissions s'accroître fortement.

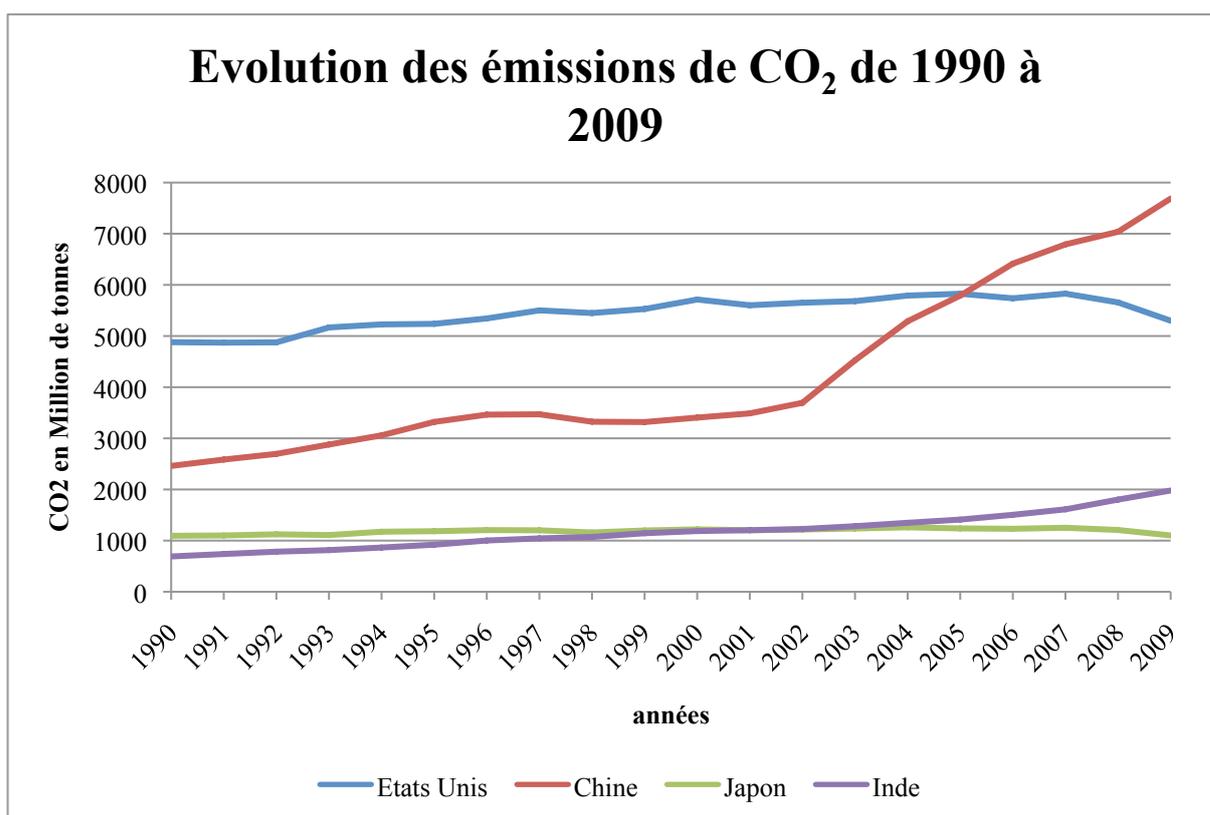


Figure 21. Evolution des émissions de CO₂ de 1990 à 2009 des Etats Unis, Chine, Japon et de l'Inde (37)

De manière générale, l'évolution des émissions des 4 plus importants émetteurs de 1990 ne semblent pas tendre, vers une diminution. Sur ces quatre pays, le Japon est le seul à rentrer dans le domaine d'applications du Protocole de Kyôto. Il serait également le seul à conserver sa croissance, tout en maintenant son niveau d'émissions de CO₂.

Les résultats des autres pays, participant au groupe des 10 premiers émetteurs de CO₂ en 1990, sont présents à la figure 22.

- Le Royaume Uni semble avoir trouvé une solution, pour réduire ses émissions de CO₂. En 1999, le Royaume Uni a fermé ses mines de Charbon. Cela a fortement contribué à cette réduction.
- Le Canada a continué à augmenter ses émissions de CO₂. Il semblerait cependant, que la tendance s'inverse depuis 2007.
- Les émissions de l'Italie, suivent à leur échelle, la même tendance que celles du Canada.
- La France a vu ses émissions fluctuer entre 1990 et 2009. Le résultat général de cette période, est une diminution des émissions.
- La Pologne a fortement diminué ses émissions au cours des années.
- L'Afrique du Sud, non couvert par le protocole de Kyôto a eu de plus importantes émissions de CO₂ au cours de cette période.

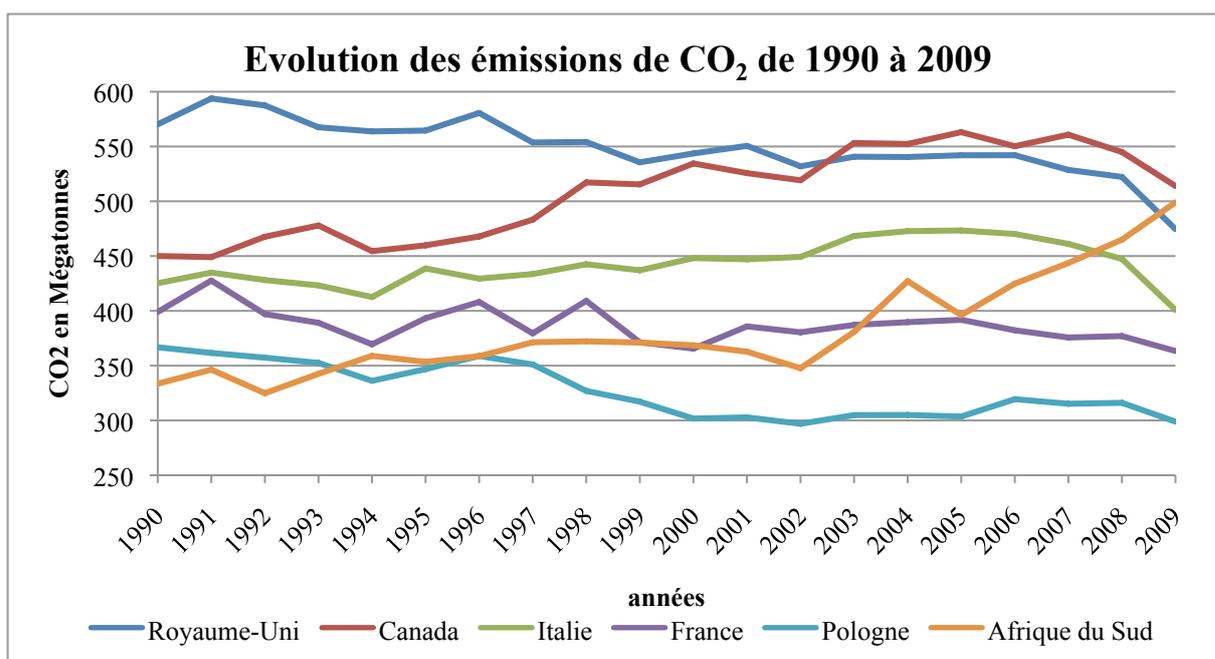


Figure 22. Evolution des émissions de CO₂ de 1990 à 2009 du Royaume-Uni, du Canada, de l'Italie, de la France, de la Pologne et de l'Afrique du Sud. (37)

Les pays de l'Union Européenne engagés dans le Protocole de Kyôto, ont obtenu de bons résultats.

Le bilan de ces deux figures, montre une croissance très prononcée pour les pays « en développement », et une légère diminution pour les pays soumis aux exigences du Protocole de Kyôto. Ces résultats ne sont pas encore influencés par la situation économique mondiale, cependant, une diminution est prévisible pour les années à venir.

Le pourcentage d'évolution de ces pays est repris dans la figure 23. Les émissions de pays « en développement » présentent des augmentations très marquées.

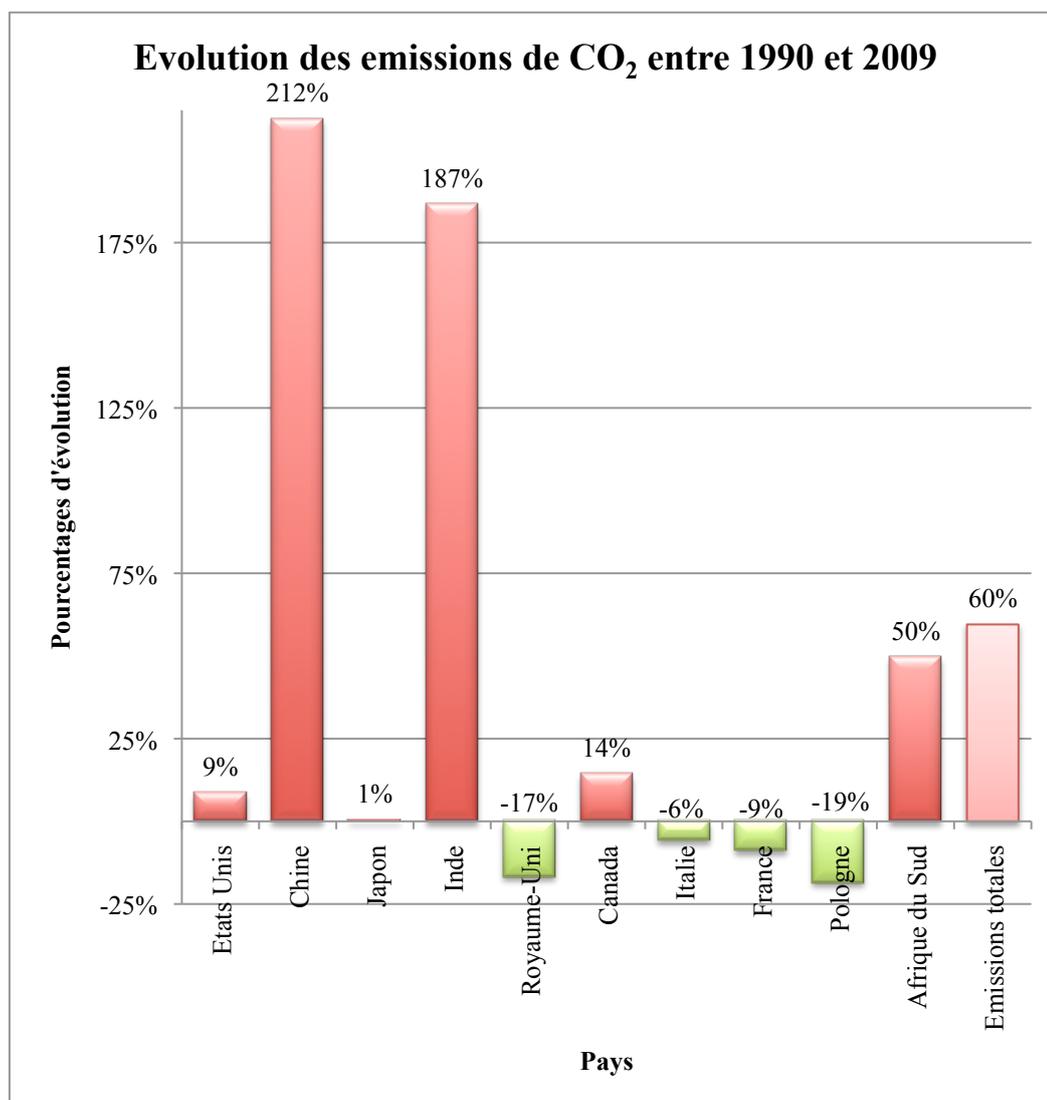


Figure 23. Evolution des émissions de CO₂ entre 1990 et 2009, des 10 plus importants émetteurs de CO₂ de 1990. (37,28,28)

En analysant ces résultats préliminaires, nous nous apercevons, que de nombreux facteurs rentrent en compte, dans l'atteinte de ces résultats.

Effectivement, l'absence des plus grands émetteurs de GES et des pays « en développement » dans le Protocole, ainsi que la crise économique mondiale, ne favoriseraient pas une réduction significative mondiale.

En 2009, les émissions mondiales avaient augmenté de 60%, par rapport à 1990, pour un objectif annoncé de 8% de réduction d'ici 2012.

Néanmoins, ces résultats ne constituent pas un « échec ». En effet, les résultats encourageants de l'Europe, entre autres, nous démontrent que des actions nationales peuvent interagir sur les émissions de GES.

Les exemples sont nombreux, et pourraient encourager tous les pays à persévérer, dans les actions environnementales.

Comme le prévoit le Protocole, l'entraide entre les pays, en partageant leurs méthodes et leurs expériences, pourrait être une solution, en vue d'obtenir des résultats efficaces et à moindre coût.

Pour cela, le GIEC a proposé dans son dernier rapport, des axes à suivre au travers d'exemples, afin de guider les pays à engager leurs actions écologiques. Ces exemples seront présentés en annexe B.

2 La politique écologique française

La France étant un pays industrialisé de l'Union européenne, s'est également engagée dans une politique écologique. Lors du Protocole de Kyôto, l'Union européenne, alors constituée de 15 pays, s'est engagée sur une diminution de 8% par rapport aux émissions de 1990. Lors de ces accords, elle a établi des objectifs différents, en fonction des négociations de chaque pays membre, afin de satisfaire son objectif global. Celui de la France a été défini, pour une réduction de 8%.

Afin d'aider les pays à atteindre leurs objectifs, l'Union européenne a présenté une directive en 2003, facilitant les échanges de quotas de GES (figure 24). Cette directive a été élaborée par période, jusqu'à l'année 2020, dans l'objectif d'une réduction de 20% par rapport à 1990.

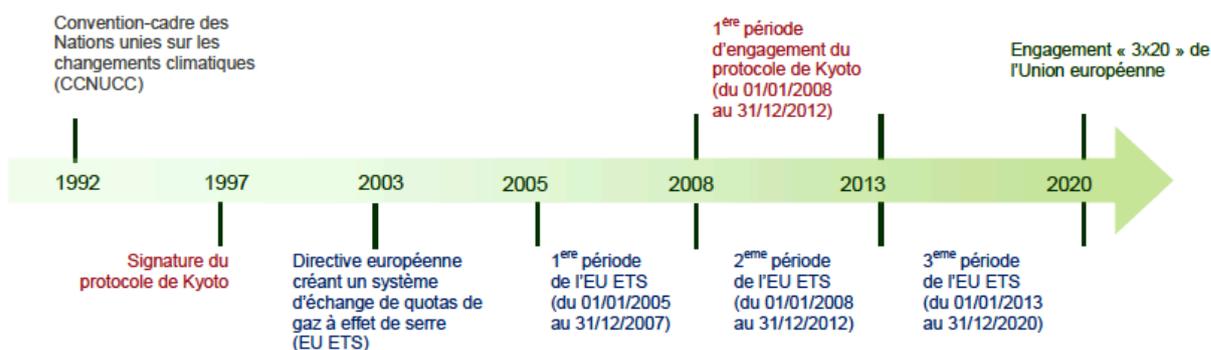


Figure 24. Chronologie des étapes majeures, dans la prise de conscience internationale. (13)

De nombreuses autres directives ont été établies, afin de garantir une satisfaction des objectifs. La France en a donc bénéficié lors de la mise en place de son Plan Climat en 2004, puis l'a actualisé en 2010. Les modifications apportées ont pour but, d'intégrer les engagements du Grenelle de l'environnement, dans la lutte contre le réchauffement climatique.

Ce nouveau Plan Climat a pour vocation, de réduire les émissions de la France de 21,8% entre 2005 et 2020.

2.1 Le « Grenelle de l'environnement ».

Le Grenelle de l'environnement était un projet, visant à réunir plusieurs acteurs, afin de lutter contre le réchauffement climatique, et prévenir les effets de la pollution sur la santé. Le 16 juillet 2007, l'Etat et les représentants de la société civile (collectivités territoriales, ONG environnementales, entreprises et syndicats), se sont réunis pour la première fois, dans le but de définir « une feuille de route ».

Les 6 groupes de travail, ainsi que les nombreux consultants, ont permis de présenter un projet de loi, appelé « Grenelle 1 » en février 2009.

a. La loi « Grenelle 1 » (42)

Cette loi a été adoptée à la quasi-unanimité par le Parlement. Son rôle est de définir, les mesures à prendre afin de lutter contre le réchauffement climatique. 57 mesures ont donc été définies pour les secteurs :

- de l'énergie et du bâtiment,
- des transports,
- de la biodiversité, l'agriculture, la mer et la forêt,
- de la gouvernance, l'information et la formation,
- des déchets,
- des risques pour l'environnement et la santé.

Toutes ces mesures ont pour objectif de diviser par 4, les émissions de GES, entre 1990 et 2050.

b. La loi « Grenelle 2 » : (42)

Autrement appelé « engagement national pour l'environnement », cette loi établie en 2010, définit les moyens, pour atteindre les objectifs fixés par le « Grenelle 1 ».

D'autres lois, telle « la responsabilité environnementale », ont été également promulguées, afin de responsabiliser les gros pollueurs.

2.2 Quelques chiffres de la France

a. Le Pouvoir de Réchauffement Global (PRG) :

D'après le rapport d'inventaire du SECTEN d'avril 2012, la France serait en bonne voie pour répondre aux engagements de Kyoto (figure 25).

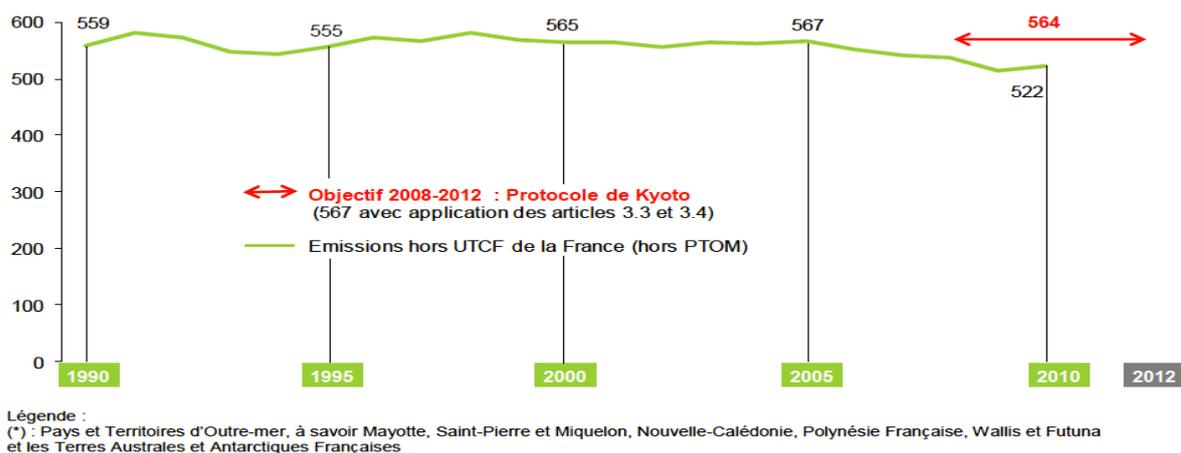


Figure 25. Emissions hors Utilisation des Terres, Changement d'affectation des Forêts (UTC⁷) et objectifs pour la France au sens de Kyoto en Mt équiv-CO₂ (13)

Les émissions de la France feraient partie, de celles respectant leurs engagements pris au Protocole de Kyoto.

Afin de comprendre ces résultats, nous allons étudier plus en détail, quelques uns des GES.

b. L'émission globale

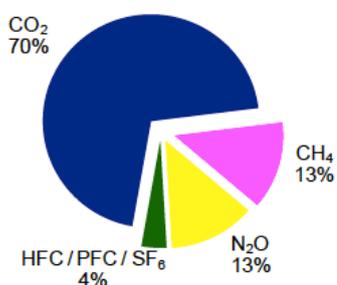


Figure 26. Contribution des différents gaz à effet de serre au PRG en France métropolitaine, pour l'année 2010 (13)

⁷ « Le total UTCF représente le bilan des absorptions et des sources d'émission qui couvre la récolte et l'accroissement forestier, la conversion des forêts (défrichement) et des prairies ainsi que la conversion des sols dont la composition en carbone est sensible à la nature des activités auxquelles ils sont dédiés (forêt, prairie, terre cultivée, etc.). » (13)

La répartition des GES des émissions françaises de 2010, serait semblable à celles de la Planète (figure 26). Par conséquent, nous pouvons supposer que les actions, ainsi que les résultats de la France, peuvent servir de références, aux autres pays industrialisés.

c. L'émission de CO₂ en France :

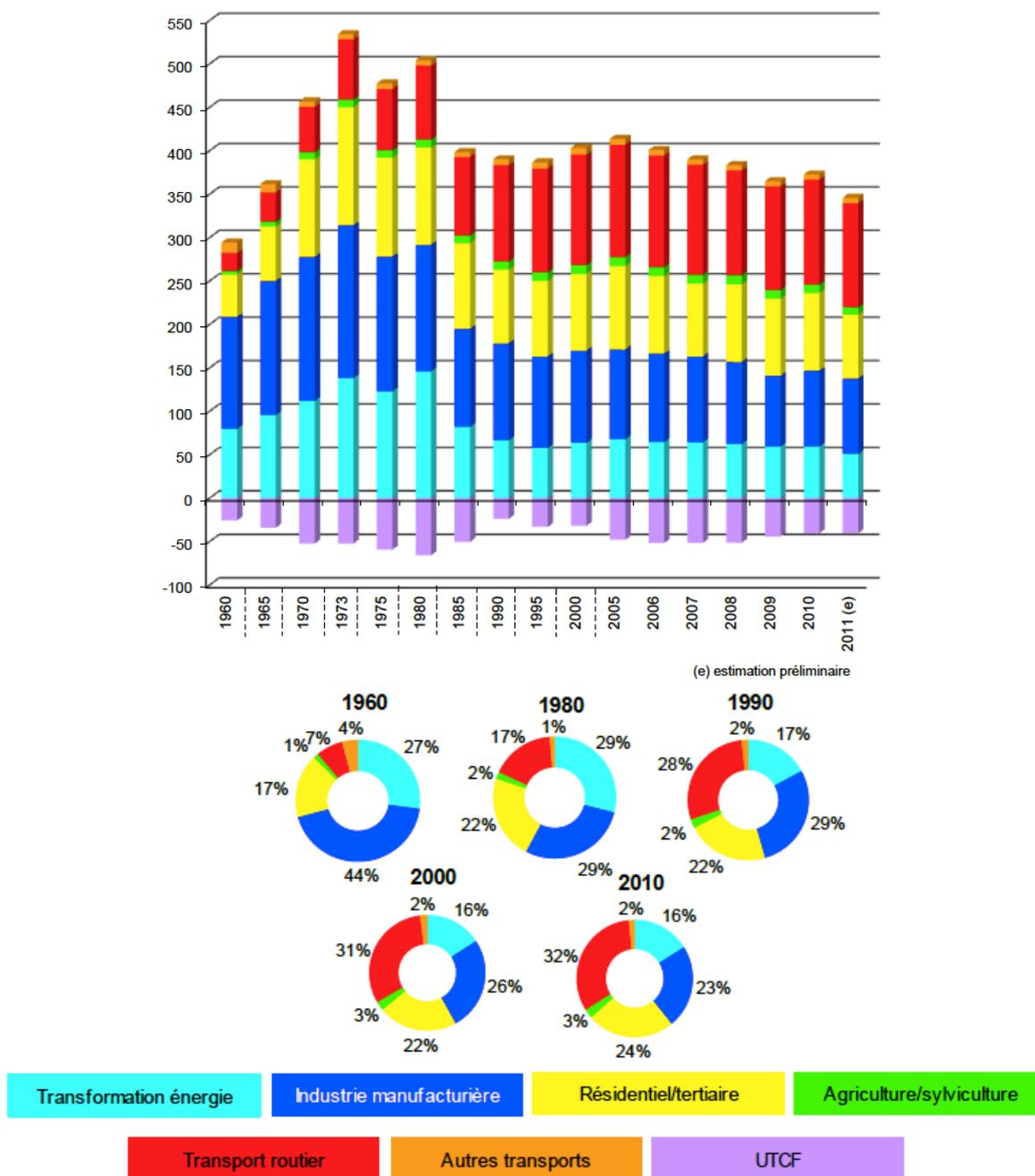


Figure 27. Emissions atmosphériques de CO₂ par secteur en France métropolitaine en Mt (13)

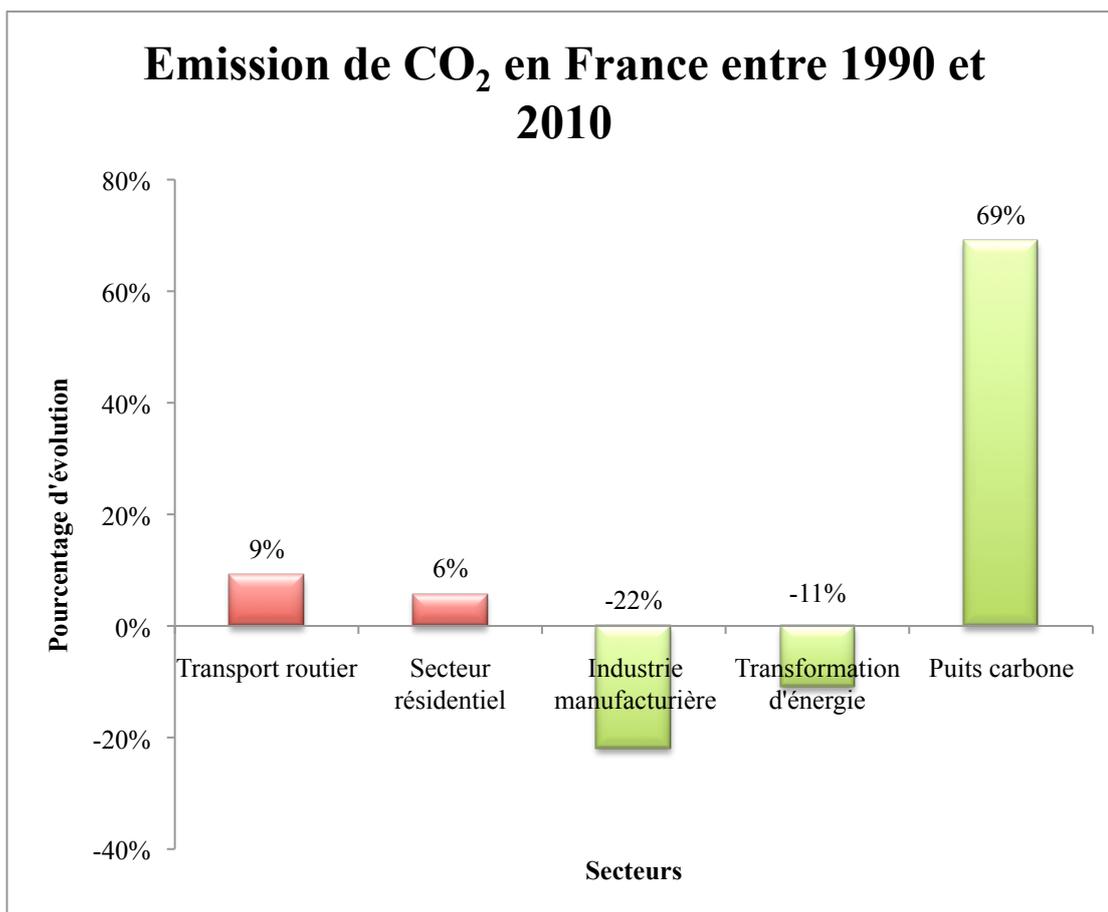


Figure 28. Emission de CO₂ en France, entre 1990 et 2012 (13)

Le dioxyde de carbone en France a connu des variations de quantité au cours des années. A partir de 1973, les années ont été marquées par une inversion de tendance (figure 27). Plusieurs raisons peuvent être évoquées, tels que les chocs pétroliers de 1973 et 1979.

L'évolution des émissions de CO₂ entre 1990 et 2010, témoigne de l'implication de la France dans les actions environnementales.

Par exemple, l'augmentation du secteur des transports routiers de plus de 717% au cours de cette période, alors que l'augmentation des émissions ne serait que de 9%. Ou encore, l'instauration du biocarburant et l'aide gouvernementale pour le renouvellement du parc automobile, seraient les principales causes de ce résultat (figure 28) (13).

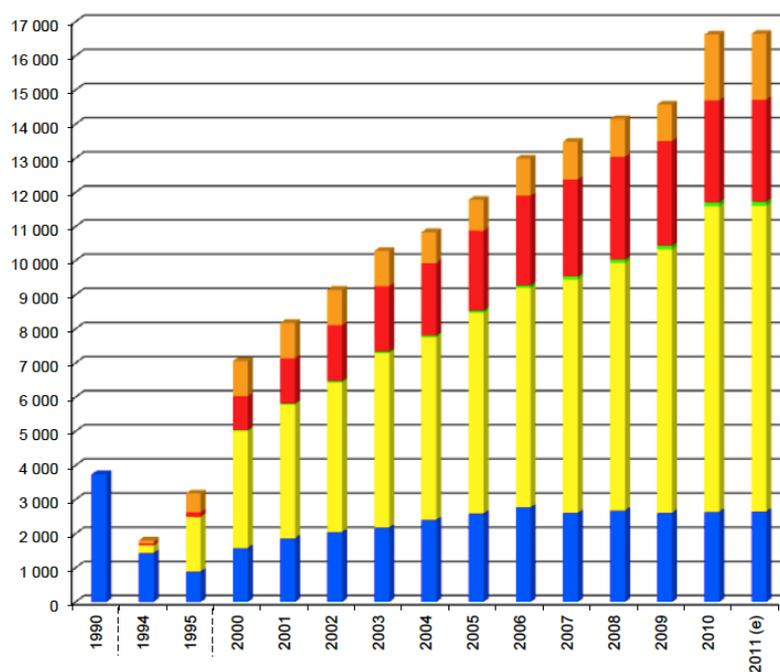
La diminution de 22% d'émission dans le secteur de l'industrie manufacturière, serait due à la réglementation de 1998, visant à imposer des rendements minimaux aux chaudières industrielles (43).

Néanmoins, d'autres facteurs ont influencé sur ces résultats. Il s'agit par exemple de la baisse d'activité dans le secteur de la sidérurgie, ou des minéraux métalliques, pour des raisons économiques.

La diminution des émissions de 11% dans le secteur de la transformation énergétique, serait due au programme électronucléaire.

Enfin, le résultat le plus marqué est celui des puits de carbone. Ce résultat est du aux actions environnementales, telle que le reboisement des forêts.

d. Les hydrofluorocarbures :



(e) estimation préliminaire

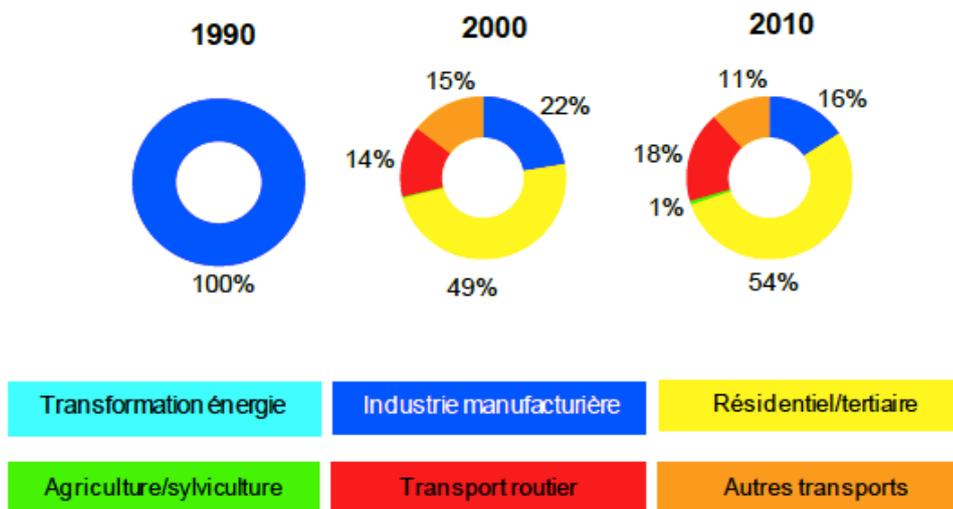


Figure 29. Emissions atmosphériques de HFC par secteur, en France métropolitaine en kt CO₂e (13)

Les hydrofluorocarbures (HFC) sont les seuls GES en France, dont les émissions augmenteraient (figure 29). Ils ne présentent pas un grand pourcentage dans la répartition des GES émis en France, mais ils ont un fort Pouvoir de Réchauffement Global (PRG). Avec 345% d'émissions supplémentaires depuis 1990, les HFC sont des gaz à effet de serre, allant à l'encontre des actions environnementales.

Effectivement, l'utilisation des HFC comme gaz réfrigérant a augmenté, afin de remplacer les CFC, interdits par le traité de Montréal. Les CFC étaient connus, comme des substances appauvrissant la couche d'ozone stratosphérique. Suite à ce remplacement, les émissions de HFC ont fortement augmenté, dans les secteurs résidentiels, et celui des transports.

Face à la progression des émissions de ces GES, la réglementation européenne a commencé à émettre des directives, sur la réglementation de ces gaz. Elles concernent essentiellement le secteur automobile, ainsi que l'industrie de la climatisation.

En exemple, d'après la Directive 2004/40/CE du Parlement européen et du Conseil (44) :

« Les émissions d'hydrofluorocarbone-134a (HFC-134a), qui a un potentiel de réchauffement planétaire de 1300, provenant des systèmes de climatisation des véhicules à moteur, sont source de préoccupations croissantes en raison de leur impact sur les changements climatiques. Des alternatives économiquement avantageuses et sûres devraient pouvoir remplacer très prochainement l'hydrofluorocarbone-134a (HFC-134a). Il conviendrait de procéder à un réexamen pour déterminer, à la lumière des progrès réalisés dans le domaine du confinement potentiel des émissions ou du remplacement des gaz à effet de serre fluorés dans lesdits systèmes, si la présente directive devrait être étendue à d'autres catégories de véhicules à moteur et si les dispositions relatives au potentiel de réchauffement planétaire desdits gaz devraient être modifiées, compte tenu de l'évolution technologique et scientifique et de la nécessité de respecter les délais de planification de la production industrielle. »

A partir de cette directive, les pays doivent faire des arrêtés ou des décrets, transposés aux lois nationales. De ce fait, les industries utilisant ces gaz, devraient entreprendre des mesures modernes dans le confinement, ou le remplacement de ces gaz.

La politique environnementale semble très difficile à mettre en place. Les négociations sont longues et les accords internationaux demandent une grande implication de la part de tous les acteurs.

De ce fait, le Protocole de Kyôto présenté en 1997 et rentré en vigueur en 2005, est une réelle avancée. Il s'agit cependant, d'une première véritable expérience à améliorer. Les prochaines améliorations conclues, lors des dernières conférences des Parties, devraient permettre d'atteindre des objectifs plus réalisables.

En revanche, certaines nations ne croiraient plus en ce Protocole de Kyôto, et préféreraient se retirer, au lieu de générer, des contraintes supplémentaires à leur pays. C'est le cas du Canada, qui a récemment pris la décision de se retirer du Protocole.

La France a, quant à elle, obtenu de bons résultats, ces 10 dernières années. En effet, les actions entreprises avec « le Grenelle de l'environnement », ont permis de réduire les émissions de GES, en deçà des maximums prévus.

Cependant, un type de GES donne de mauvais résultats. Il s'agit des HydroFluoroCarbures (HFC). Ces gaz sont en constante augmentation, depuis l'interdiction de l'utilisation des Chlorofluorocarbures (CFC), qui appauvrissaient la couche d'ozone. Etant donné, qu'il s'agit du seul gaz, dont les émissions augmentent, une réglementation particulière de l'Union européenne, est en train d'être mise en place.

Par conséquent, les utilisateurs de ce type de gaz devraient déjà anticiper, une réduction, ou une suppression de leurs émissions.

3^{ème} partie : Les politiques environnementales des industries du médicament : Application aux aérosols pharmaceutiques.

A l'heure actuelle, les industries du médicament s'engagent pour l'environnement, en établissant des chartes écologiques. Ces engagements permettent de valoriser les entreprises auprès des consommateurs, et d'améliorer leur image de marque.

Dans certains cas, il s'agit de l'empreinte carbone, avec une réduction de la consommation d'énergie, ou encore, avec une réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Cependant, les actions écologiques n'ont pas uniquement cette utilité. Elles peuvent également, faciliter la revue des processus, en vue d'une diminution des gaspillages. Elles deviennent alors, de véritables atouts économiques, en vue d'une diminution des coûts.

Dans cette partie, nous suivrons un projet qui vise à diminuer les consommations de gaz à effet de serre (HFC 134a), dans le processus de fabrication d'aérosols pharmaceutiques. Ce projet a déjà fait l'objet d'un mémoire de stage, réalisé en 2012 pour le Master 2 *Pharmacie Industrielle, Formulation, Procédés et Production*, validé à l'Université Joseph Fourier de Grenoble. Il a été conduit au sein d'une industrie pharmaceutique qui possède une grande expérience, ainsi qu'un rôle d'expert, dans la production d'aérosols pharmaceutiques.

Dans un premier temps, nous décrirons les aérosols pharmaceutiques avec des définitions, puis le processus de fabrication.

A la suite de ces généralités, l'ensemble des projets visant à réduire la consommation de gaz à effet de serre sera présenté, au travers de leurs environnements et de leurs avantages écologiques et économiques.

Le projet qui sera ensuite détaillé, est l'optimisation de la gestion du stock en gaz à effet de serre. Le plan directeur et les résultats du projet seront ensuite étudiés.

Enfin, les plans directeurs des autres projets seront également présentés, en vue de compléter cette action écologique industrielle.

1 Les préparations pour inhalation.

Définition de la pharmacopée européenne : (45)

« Les préparations pour inhalation sont des préparations liquides ou solides destinées à être administrées dans les poumons sous forme de vapeurs ou d'aérosols, en vue d'une action locale ou systémique. Elles contiennent une ou plusieurs substances actives, qui peuvent être dissoutes ou dispersées dans un excipient approprié. »

« Les préparations pour inhalation peuvent, suivant leur type, contenir des gaz propulseurs, des cosolvants, des diluants, des conservateurs antimicrobiens, des solubilisants, des stabilisants, etc. Ces excipients n'exercent aucun effet notable sur les fonctions de la muqueuse du tractus respiratoire et de ses cils. [...] »

« Les préparations qui doivent être converties en aérosols (dispersion de particules solides ou liquides dans un gaz) sont administrées à l'aide de l'un des dispositifs suivants :

- *nébuliseur,*
- *inhalateur pressurisé à valve doseuse,*
- *inhalateur à poudre »*

1.1 Les “MDI” (metered dose inhaler), inhalateur pressurisé à valve doseuse.

1.1.1 Définition de la pharmacopée européenne :

« Les préparations liquides dispensées au moyen d'inhalateurs pressurisés à valve doseuse sont des solutions, suspensions ou émulsions conditionnées en récipients, comportant une valve doseuse et maintenues sous pression avec des gaz ou des mélanges de gaz propulseurs liquéfiés appropriés, qui peuvent également servir de solvants. [...] » (45)



1.1.2 Les composants.

Ils sont constitués :

- Des cartouches en aluminium et des valves avec chambre doseuse.
- Des étiquettes et des applicateurs.
- Des articles de conditionnement réglementaires.



1.1.3 Le gaz propulseur : HFC 134a

a. Informations générales.

Le gaz est du propellant HFC-134A. C'est un HydroFluoroCarbure (HFC), qui a remplacé le ChloroFluoroCarbure (CFC) R-12, dans les applications pharmaceutiques, ainsi que dans d'autres applications⁸. Ce gaz appartient aux « gaz à effet de serre », et possède un Pouvoir de Réchauffement Global (PRG) de 1300 équiv-CO₂.

b. Sa formule chimique (figure 30).

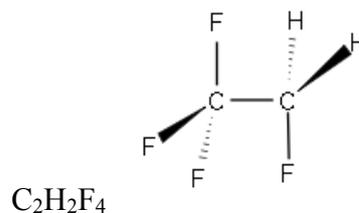


Figure 30. Formule chimique du HFC 134a

c. Les propriétés physico-chimiques (tableau 8).

Les propriétés physico-chimiques du gaz, vont permettre de connaître son état physique, dans une zone de température et de pression données.

⁸ Les CFC, ainsi que les HFC sont également utilisés dans la réfrigération, la climatisation, les mousses et la protection contre les incendies et les solvants.

Tableau 8. Propriétés physico-chimiques (46)

Masse Molaire	g/mol	102,0
Point de fusion	°C	-101
Point d'ébullition (sous 1.013 bar)	°C	-26,4
Densité du liquide saturé à 25°C	kg/dm ³	1,212
Densité de la vapeur saturée au point d'ébullition	kg/m ³	5,29
Tension de vapeur à 25°C	bar	6,63
à 50°C		13,2
Température critique	°C	101
Pression critique	bar	40,7
Densité critique	kg/dm ³	0,512
Chaleur latente de vaporisation au point d'ébullition	kJ/kg	210,3
Conduction thermique à 25°C		
Liquide		0,087
Vapeur sous 1.013 bar	W/(m.°C)	0,0148
Tension de surface à 25°C	mN.m ⁻¹	7,9
Solubilité à 25°C		
du fluide dans l'eau sous 1.013 bar	% poids	0,09
de l'eau dans le fluide		0,097
Viscosité à 25°C		
Liquide	mPa.s	0,21
Vapeur sous 1.013 bar		0,0124
Chaleur spécifique à 25°C		
Liquide	KJ/(kg.°C)	1,46
Vapeur sous 1.013 bar	KJ.(kg.°C)	0,874
Ratio Cp/Cv à 25°C sous 1.013 bar		1,118
Inflammabilité dans l'air		Aucune
Point éclair		Aucune
Potentiel d'action sur la couche d'ozone		0

d. Le stockage (tableau 9).

Tableau 9. Propriétés de stockage (données fournisseur)

Conditions de stockage	Stocker :
Recommandées	Dans un endroit frais et bien ventilé A l'écart de toute source d'ignition A l'écart de toute source de chaleur
Matières incompatibles	Oxydant puissant Hydroxydes alcalins Métaux alcalino-terreux Métaux non ferreux (Al, Zn, Sn) et leurs alliages
Métaux d'emballage :	
Recommandés	Acier ordinaire Acier inoxydable
Contre indiqués	Matières plastiques Alliages contenant plus de 2% de Magnésium

1.2 Le processus de fabrication.



Figure 31. Représentation schématique du processus de fabrication

Description du processus (figure 31) :

L'objectif de la micronisation est de réduire la taille des particules de principe actif, afin qu'elles atteignent leur taille d'efficacité ($<0,1\mu\text{m}$ à $10\mu\text{m}$).

La seconde étape est le remplissage. La matière première est pesée, mélangée avec du gaz propulseur sous forme liquide. Une fois le mélange préparé, les valves sont serties aux cartouches et le mélange est injecté par les valves. Les cartouches sont ensuite pesées et identifiées. Après avoir passé les contrôles, elles sont mises en bacs pour une période de quarantaine.

La quarantaine a pour rôle de maîtriser l'éventualité d'une fuite, des cartouches. A la suite de cette quarantaine, les cartouches sont transférées au conditionnement.

Au cours du conditionnement, les cartouches sont pesées et testées, afin de garantir leurs conformités. Puis, elles sont étiquetées et installées dans leurs applicateurs. Après cela, le produit est conditionné dans son étui avec sa notice. Le tout est préparé dans des cartons d'expédition en attente de la libération du lot.

A la suite de ces généralités sur les aérosols pharmaceutiques, nous présenterons les projets visant à réduire la consommation de gaz à effet de serre.

2 La présentation des projets

Afin de réduire la consommation de ce gaz, plusieurs projets sont en cours :

1. L'optimisation de la gestion de stock en gaz propulseur des aérosols.
2. L'optimisation des procédés de rinçage et de nettoyage.
3. L'optimisation d'une étape de production.

Ces projets ont été acceptés par la direction, afin de diminuer la consommation de gaz à effet de serre, mais également de réduire le gaspillage. Chacun d'eux a fait l'objet d'une étude préliminaire, permettant d'évaluer leurs avantages technologiques et économiques.

2.1 L'environnement des projets.

Le processus de la consommation du gaz, ainsi que les périmètres des projets, se présentent ainsi :

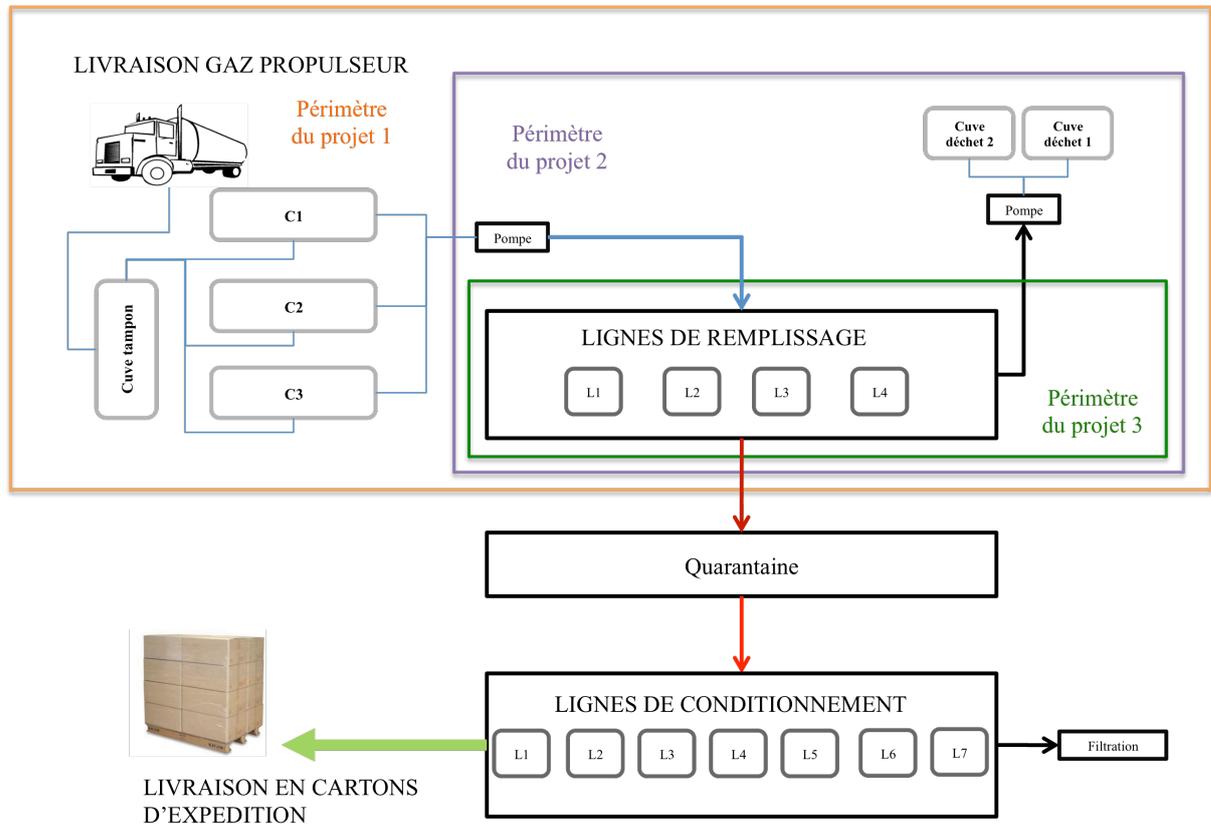


Figure 32. Environnement des projets de réduction des émissions de gaz à effet de serre

Description du processus :

La première étape consiste à réceptionner la matière première du fournisseur. Cette réception se fait sous forme vrac, dans des citernes convoyées par le réseau routier.

La matière première est ensuite transférée vers des citernes fixes (C1, C2, C3), qui servent à stocker le gaz propulseur ; cette action s'appelle le dépotage. La particularité de ces cuves est qu'elles se trouvent à l'extérieur, sans système de thermorégulation, ni de contrôle de pression.

Le gaz propulseur est ensuite acheminé par une boucle de circulation et stocké dans des cuves tampons thermo-régulées. Elles se trouvent juste en amont de chaque ligne de remplissage, et sont équipées de débitmètres et de pesons.

L'étape suivante est, le processus de remplissage des cartouches en production, sous atmosphère contrôlée.

Les installations sont équipées de systèmes de récupération des déchets, en vue d'évacuer le gaz propulseur utilisé, lors des rinçages et des nettoyages.

A la suite de cette étape, les cartouches sont mises en quarantaine, afin de contrôler leurs étanchéités.

Sorties de quarantaine, les cartouches sont pesées et testées. La première bouffée est convoyée jusqu'à un filtre et émise dans l'atmosphère.

Puis, les cartouches sont conditionnées dans leurs boîtes, et l'ensemble est stocké en attente de livraison.

2.2 Les avantages écologiques et économiques.

- a. L'optimisation de la gestion de stock en gaz propulseur des aérosols.

Ce projet a été confié au service « Production ». D'après l'étude préliminaire, il devrait aboutir à un gain de 30 tonnes de gaz propulseur émis par an.

- b. L'optimisation des procédés de rinçage et de nettoyage.

Ce projet est conduit par le service « Validation ». Il représenterait un gain de 33 tonnes de gaz propulseur par an.

- c. L'optimisation d'une étape de production.

Celui ci vise à diminuer la consommation de gaz, sur une étape du processus de remplissage. Ce travail est mené par un service, en charge de la revue des processus de production. Ce projet représenterait un gain d'environ 16 tonnes de gaz émis par an.

Ces trois projets permettraient de faire diminuer la consommation d'environ 80 tonnes de gaz à effet de serre, soit 104 000 tonnes d'équiv-CO₂. Ceci correspondrait à une économie de 635 000 euros annuel. Ensembles, ces projets représenteraient un important gain économique.

Le projet sur l'optimisation de la gestion de gaz propulseur va être présenté plus en détails dans le prochain chapitre.

3 Les projets d'optimisation de la gestion de stock en gaz propulseur dans les aérosols pharmaceutiques.

3.1 Le plan directeur du projet.

3.1.1 Le contexte du projet.

Lors de l'installation des lignes de remplissage, la gestion du gaz propulseur se faisait par un calcul de réconciliation. En 2011, l'automatisation des lignes a modifié cette méthode. Le suivi se base aujourd'hui, sur les données issues des débitmètres en début de ligne. L'automatisation permet d'enregistrer automatiquement les données de consommation, dans une base de données.

Depuis novembre 2011, la surveillance de la consommation s'est intensifiée, et des écarts entre les stocks informatiques et physiques ont été mis en évidence. Des actions curatives mises en place, consistent à réajuster les consommations aberrantes, de façon manuelle.

3.1.2 Les objectifs.

Les objectifs du projet sont :

- 1) Identifier la cause racine.
- 2) Recenser les écarts.
- 3) Corriger les anomalies.
- 4) Elaborer une solution pérenne.

3.1.3 Les gains attendus.

Les gains sont de deux types :

- Les gains sur la maîtrise du processus : En effet, la nature des écarts de stock n'étant pas connue, ils sont considérés comme des « pertes non justifiées ». Ce projet devrait permettre d'identifier la nature de ces écarts.
- Les gains financiers : Sur 4 mois, ces écarts sont chiffrés autour de 80 000 euros. Une projection sur l'année, nous amènerait à des écarts d'environ 30 tonnes de gaz, à savoir 240 000 euros.

3.1.4 Le périmètre du projet.

Le périmètre du projet est : (figure 33)

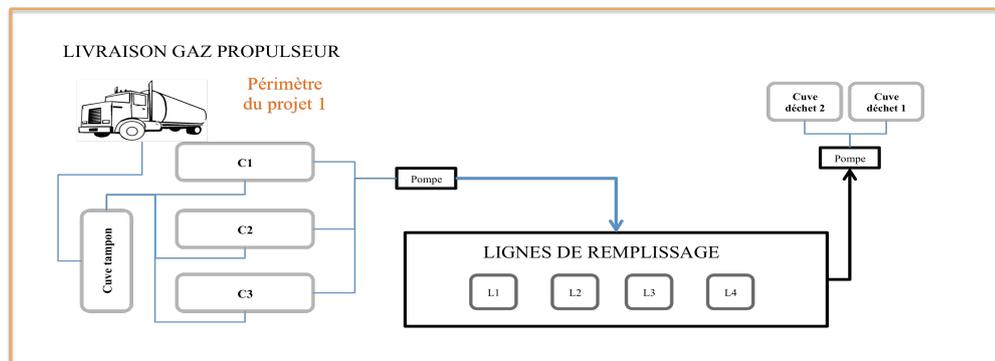


Figure 33. Périmètre du projet 1

- Les cuves extérieures (C1, C2 et C3),
- La boucle de circulation,
- Les lignes de remplissage,
- Les cuves tampons.

3.1.5 Les acteurs.

La direction a confié le projet à un chef d'équipe du remplissage. Son rôle consistait à réajuster les données de consommation, lors de chaque changement de cuve (C1, C2 et C3). Ce travail devait permettre de minimiser les écarts de stock cumulés. Toutefois, cette activité ne résolvait pas la cause de ces écarts.

Afin d'aider le chef d'équipe, notre contribution a été proposée. Ainsi, notre rôle était d'analyser les données, afin de repérer la « cause racine » des écarts. Pour cela, nous avons été amenés à consulter d'autres services et plusieurs personnes compétentes, en vue de recueillir un maximum de données.

Les autres acteurs sont :

- La personne habilitée à conduire un dépotage.
- Les opérateurs conduisant les lignes de remplissage.
- Les experts techniques des lignes de remplissage.

3.1.6 La méthode choisie.

La méthode choisie pour piloter le projet, est la méthode DMAIC (47). Cette méthodologie est élaborée, en vue d'améliorer des procédés ou pour conduire un projet.

Cette méthode est divisée en 5 phases (figure 34) :

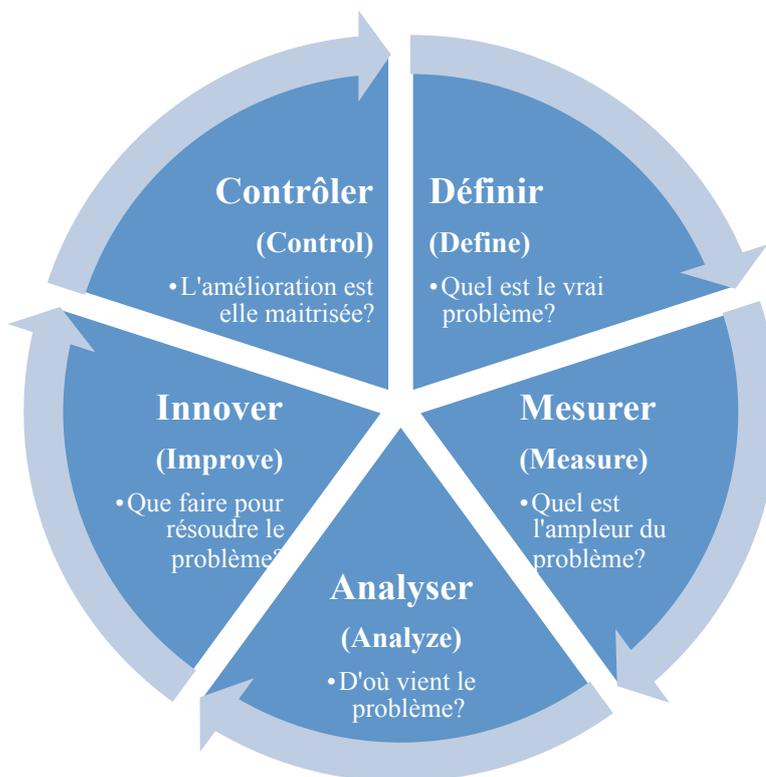


Figure 34. Représentation graphique du DMAIC

Afin d'utiliser cette méthode, une préparation minutieuse doit regrouper :

- Une connaissance complète des propriétés physico-chimiques des composés, mis en jeu.
- Le détail des processus,
- Une connaissance des principes physiques des outils de mesure.

Sans ces connaissances indispensables, les définitions des objectifs ou les interprétations des données, peuvent être subjectives et donc, source d'erreurs. Afin d'acquérir ces connaissances, des personnes compétentes sont nécessaires à la réalisation du projet.

- Définir : Identifier le problème.

L'objectif de cette première étape est de définir, les points « clefs » de la gestion de projet. Celle-ci doit contenir la définition précise du problème, de l'environnement, de la liste des collaborateurs et enfin les objectifs à atteindre.

- Mesurer : Recueillir des données.

L'une des méthodes adéquates pour recueillir des données, est celle qui consiste à établir un état des lieux des processus. Cette photographie à un instant « t », doit représenter la réalité le plus fidèlement possible, et se doit d'être objective. Pour cela, la méthodologie de l'état des lieux est basée sur une longue phase d'observation et d'interviews, ainsi que sur l'analyse des données des instruments de mesure.

- Analyser : Analyser pour identifier la cause racine.

L'analyse a pour principale fonction de déterminer la cause racine, en d'autre terme, la cause responsable de la problématique. Cependant, il s'agit de la phase la plus soumise à la subjectivité, car il existe une part d'interprétation dépendante, de la personne qui la réalise. Pour l'éviter, il est indispensable d'analyser les données, par un groupe de personnes compétentes. Une autre fonction de l'analyse est de repérer les relations, entre les caractéristiques à améliorer et les paramètres à modifier. A la suite de cette analyse, les paramètres les plus pertinents, seront sélectionnés selon des critères définis, afin d'améliorer le processus. Un des moyens nécessaire, afin d'analyser les données mesurées, est l'analyse statistique. Dans le cadre de ce projet, les données brutes sont nombreuses et ces analyses statistiques semblent être le moyen le plus approprié pour les analyser.

- Innover : Améliorer la situation.

Cette étape permet d'amener les améliorations sur le terrain, afin de diminuer les écarts par rapport à la cible du projet. Elle peut se décliner en 5 actions majeures :

- 1) Imaginer des solutions qui peuvent être apportées pour atteindre l'objectif fixé.
- 2) Sélectionner les pistes de progrès les plus prometteuses.
- 3) Analyser le risque.
- 4) Tester les améliorations pour ajuster les paramètres du processus.
- 5) Planifier les changements

Pour mettre en place cette innovation, le nouveau processus peut être testé sur une des lignes de remplissage, servant de ligne pilote. Elle permettra de déterminer les caractéristiques à mettre sous contrôle. Par conséquent, de nombreux acteurs sont à informer, ou même à former aux modifications. Les outils permettant de mettre en place et d'analyser les risques, sont nombreux. Pour la plupart, il s'agirait des mêmes outils, que pour mesurer et analyser. La différence réside essentiellement dans la planification du plan d'actions, regroupant tous les acteurs.

- Contrôler : Vérifier si l'amélioration atteint les objectifs fixés.

Ce contrôle termine la méthode du DMAIC. Son rôle est de garantir, que les améliorations réalisées sont bien appropriées et perdureront dans le temps. Pour cela, des outils tels que des cartes de contrôle, des indicateurs de performance ou des audits, permettront de certifier la maîtrise du processus.

3.2 Les résultats du projet.

3.2.1 La définition du problème.

Les données de dépotages ne correspondent pas, avec les données de consommation (mesurées en kilogrammes). Les réajustements des cuves ne montrent aucune tendance évidente, et semblent être totalement aléatoires. Le problème est alors, de déterminer un lien entre toutes ces valeurs. Après avoir revu le périmètre du projet et le processus de gestion du gaz, les différentes causes possibles ont pu être identifiées :

- 1) Celle d'une mauvaise mesure de la quantité de gaz initiale.
- 2) Celle de la nature du gaz qui, selon son état physique, modifierait sa masse.
- 3) Celle d'une fuite de gaz, en amont du système de mesure.
- 4) Celle d'une mesure de la consommation, insuffisamment précise.

Chaque cause sera donc être étudiée, en vue de déterminer la cause racine.

3.2.2 Les mesures et les analyses de la situation actuelle.

- a) Recueil des données brutes.

Des bases de données sont disponibles et ont pour rôle, de centraliser toutes les données de production, ce qui offre de nombreux avantages pour ce projet. Les données sont ensuite recueillies et regroupées en vue de les analyser.

b) Déterminer le type de données et leurs sources.

Les mesures sont réalisées selon le plan suivant.

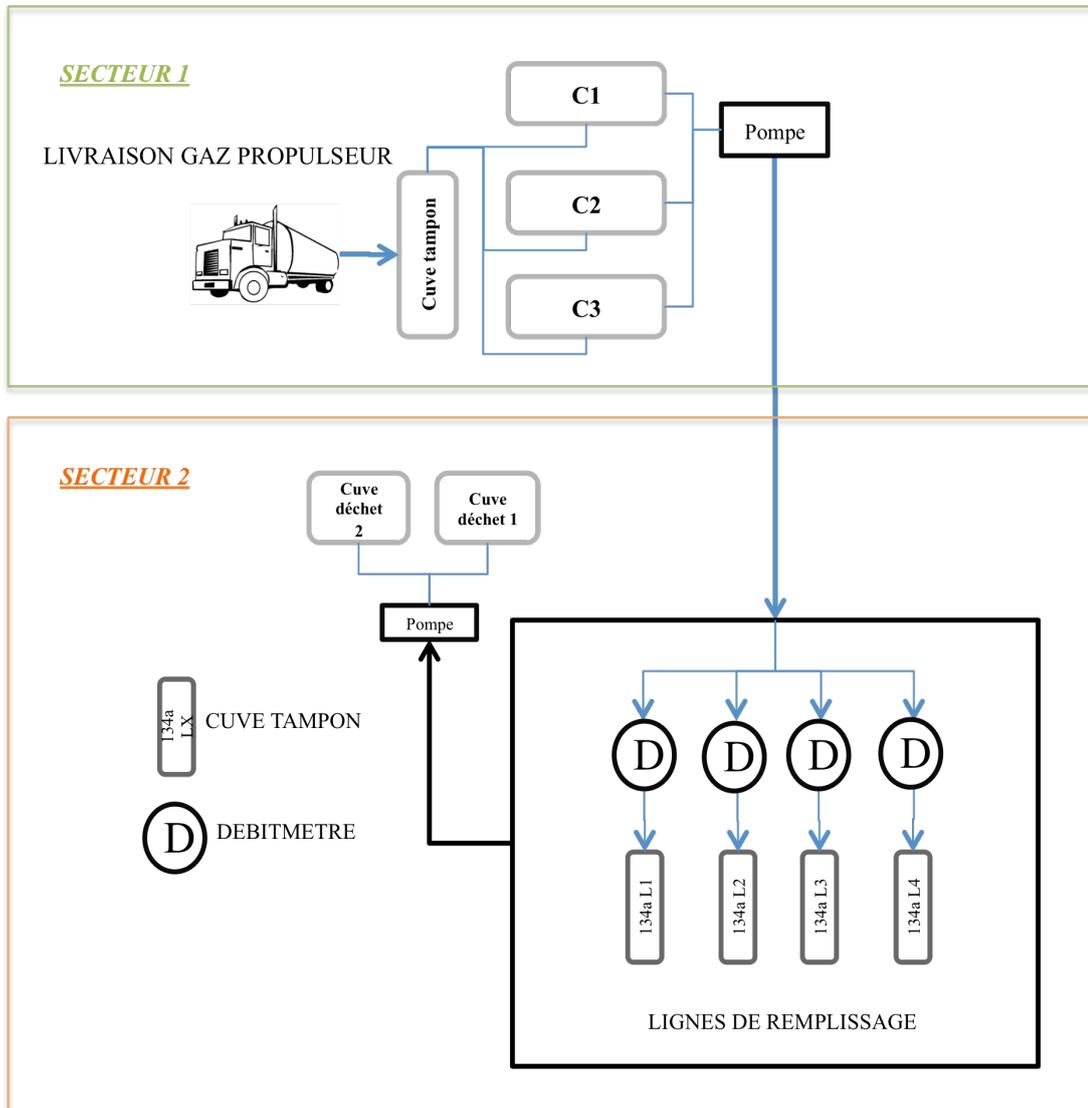


Figure 35. Représentation schématique des secteurs d'étude

Tout d'abord, la première partie du périmètre du projet sera étudiée (figure 35). Il comprend l'approvisionnement des cuves C1, C2 et C3 extérieures, ainsi que l'acheminement du gaz jusqu'en amont des lignes de remplissage. Sachant que les cuves sont situées à l'extérieur, elles sont donc soumises aux conditions climatiques.

De plus, le remplissage de ces cuves s'arrête, lorsqu'un seuil de poids est atteint. Nous pouvons supposer, qu'une variation d'état physique du gaz, pourrait engendrer des données de poids erronées. Si c'était le cas, le nombre de réapprovisionnements en gaz, devrait fluctuer en fonction des conditions climatiques.

Une recherche de fuite, ainsi que l'étude du second secteur seront également réalisées, afin de compléter l'identification de la cause racine.

Le second secteur comprend les débitmètres et les cuves tampons. Au cours de cette étude, les valeurs mesurées par les débitmètres, seront comparées aux valeurs de consommation théorique, issues d'un calcul de réconciliation. L'étude sera réalisée sur chaque ligne de remplissage, indépendamment les unes des autres.

En conséquence, l'ensemble des causes possibles sera étudié et la cause racine devrait être identifiée.

c) Etude du premier secteur (figure 36).

- Mesure du premier secteur de la quantité de gaz initiale.

Afin de connaître la consommation réelle en gaz propulseur, il suffit de faire la somme des quantités dépotées par mois. Cette étude du nombre de dépotages va nous apporter les informations suivantes :

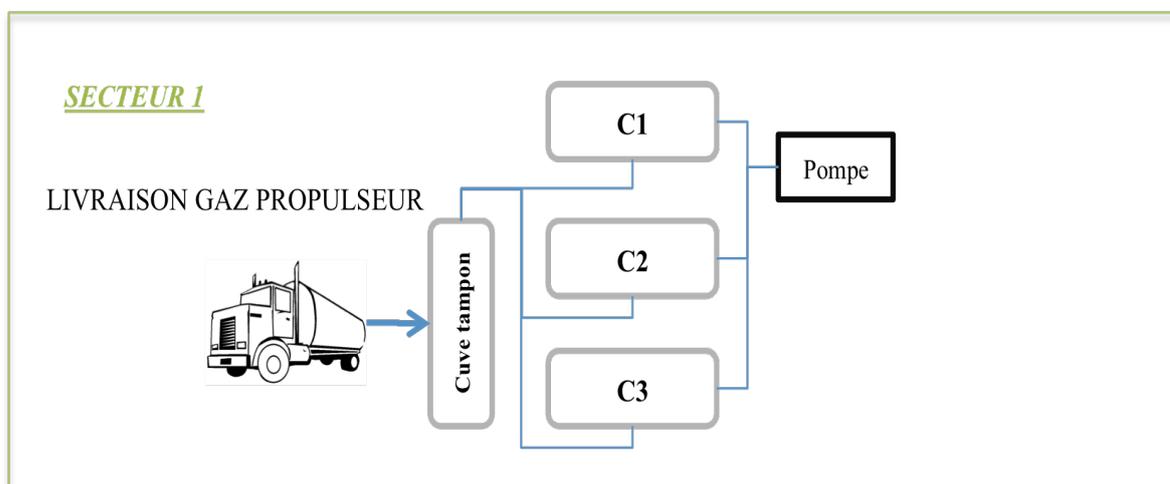


Figure 36. Représentation graphique du secteur 1

- 1) Mettre en évidence des variations de consommation, en fonction des conditions climatiques.
- 2) Evaluer des périodes de production intensive.

Cette étude présente l'avantage de donner des valeurs rapidement. En revanche, elle ne permet pas de définir le détail de la consommation.

Ces données sont calculées par la différence de poids, entre la cuve avant et après dépotage. Ces mesures sont réalisées par des pesons présents sous les cuves C1, C2 et C3, qui ne sont ni tarés, ni calibrés.

Il est important d'ajouter que ces données sont reportées manuellement par une seule personne, ce qui peut engendrer des erreurs de retranscription. La source de ces données se trouve, dans un registre de ligne sous format papier, et également reportées dans la base de données centralisée, sous format électronique. Une comparaison de ces deux sources de données a été réalisée, et n'a pas mis en évidence d'erreur de retranscription.

Les résultats de l'étude du premier secteur sont les suivants (figure 37 et 38):

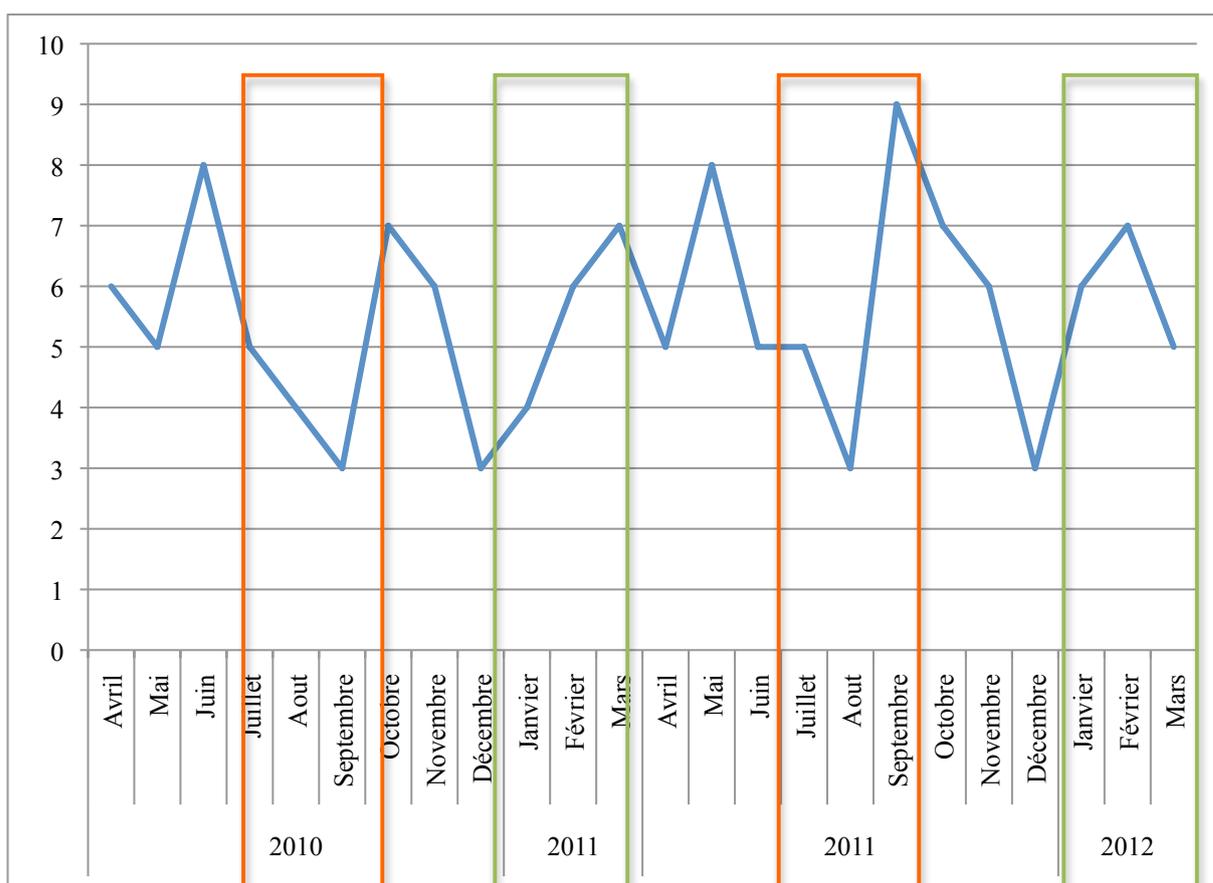


Figure 37. Nombre de dépotages sur l'ensemble des cuves de stockage

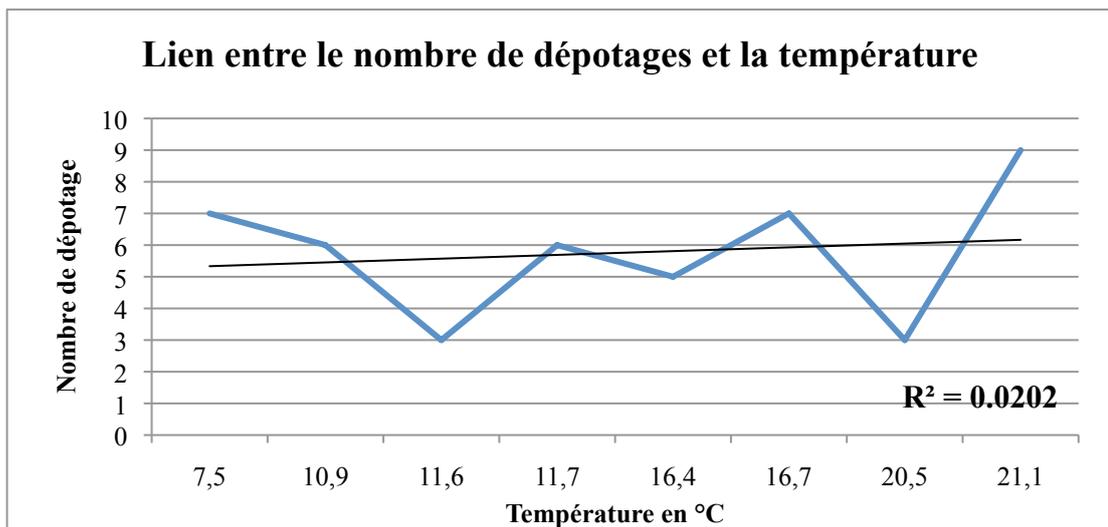


Figure 38. Lien entre le nombre de dépotages et la température

- Analyse du premier secteur.

L'analyse de la quantité de gaz initiale est la suivante :

La fréquence de dépotages nous montre deux périodes de suractivité :

- 1) Une sur les mois de Mai-Juin.
- 2) Une autre sur Octobre-Novembre.

Elles sont ensuite suivies de baisse de la production.

Ces périodes de suractivités correspondent à une anticipation de fermeture du site. Par conséquent, elles ne sont pas en lien, avec une variation de l'état physique du gaz.

Le coefficient de corrélation entre la température et le nombre de dépotages, est proche de zéro. Cela signifie, qu'il n'existe pas de lien direct entre ces deux paramètres. Ces valeurs ne peuvent donc pas être remises en cause.

L'analyse des caractéristiques physico-chimiques du gaz est la suivante :

L'état physique du gaz peut faire fluctuer la mesure de « masse » si et seulement si, la cuve est reliée à la boucle de circulation sous pression.

Or, au cours de la mesure de dépotage, la cuve est coupée du réseau de gaz propulseur par des vannes. Il ne peut donc pas y avoir de changement physique du gaz au cours du dépotage, et d'influence sur sa mesure.

En ce qui concerne les conditions de stockage, le gaz est maintenu dans des cuves en acier. Au vu des recommandations du fournisseur, il ne devrait pas de se dénaturer.

d) La recherche de fuite :

Une recherche de fuite de gaz a été réalisée. Pour cela, la mesure se fait par une inspection visuelle. Les propriétés physiques du gaz font que, lorsqu'il se propage dans l'environnement, il cristallise la vapeur d'eau atmosphérique, sur des surfaces proches et une fuite s'identifie donc rapidement.

L'absence de cristaux sur le réseau du gaz propulseur permet, de conclure à une absence de fuite.

e) Etude du deuxième secteur (figure 39).

- Mesure du deuxième secteur.

La mesure par débitmètre n'étant peut être pas suffisamment précise, les données de consommation sont recueillies, et comparées au calcul théorique de consommation.

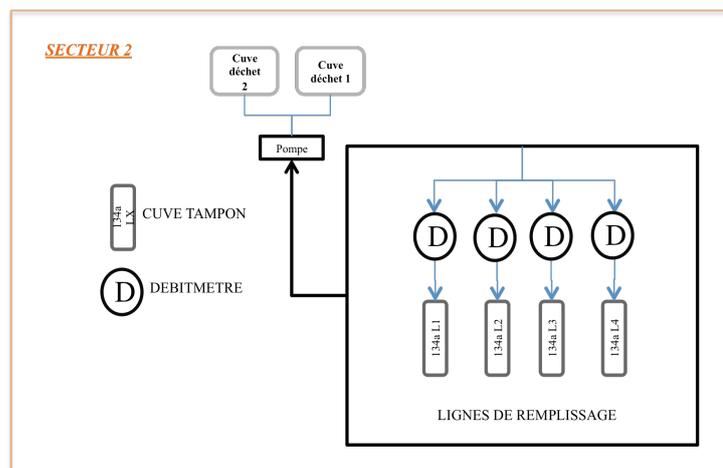


Figure 39. Représentation schématique du secteur 2

Les résultats de l'étude du second secteur sont les suivants (figures 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46 et 47) :

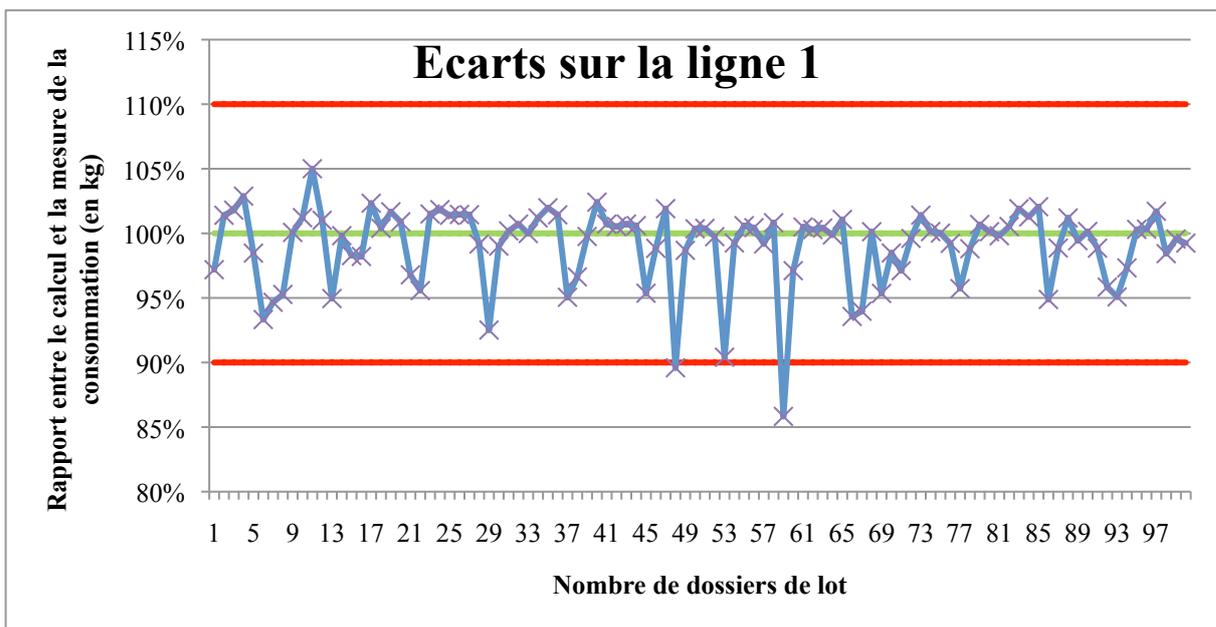


Figure 40. Les écarts sur la ligne 1, depuis le début de l'année 2012

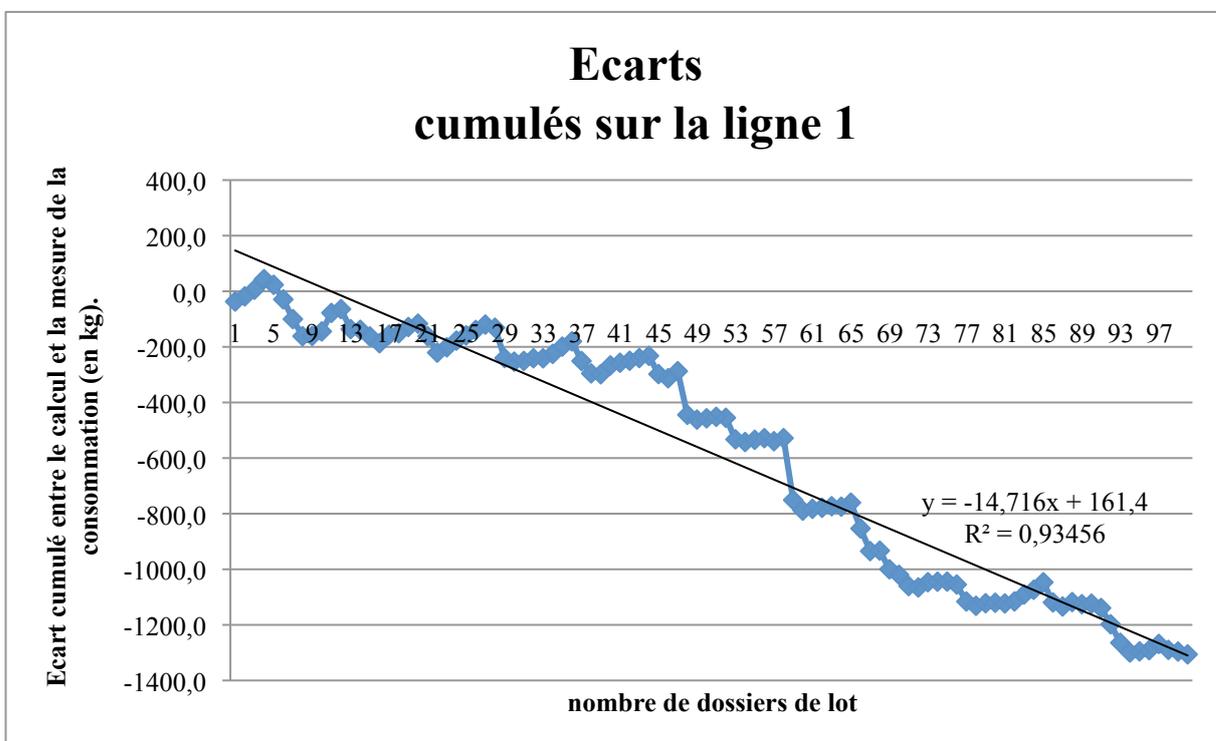


Figure 41. Les écarts cumulés sur la ligne 1, depuis le début de l'année 2012

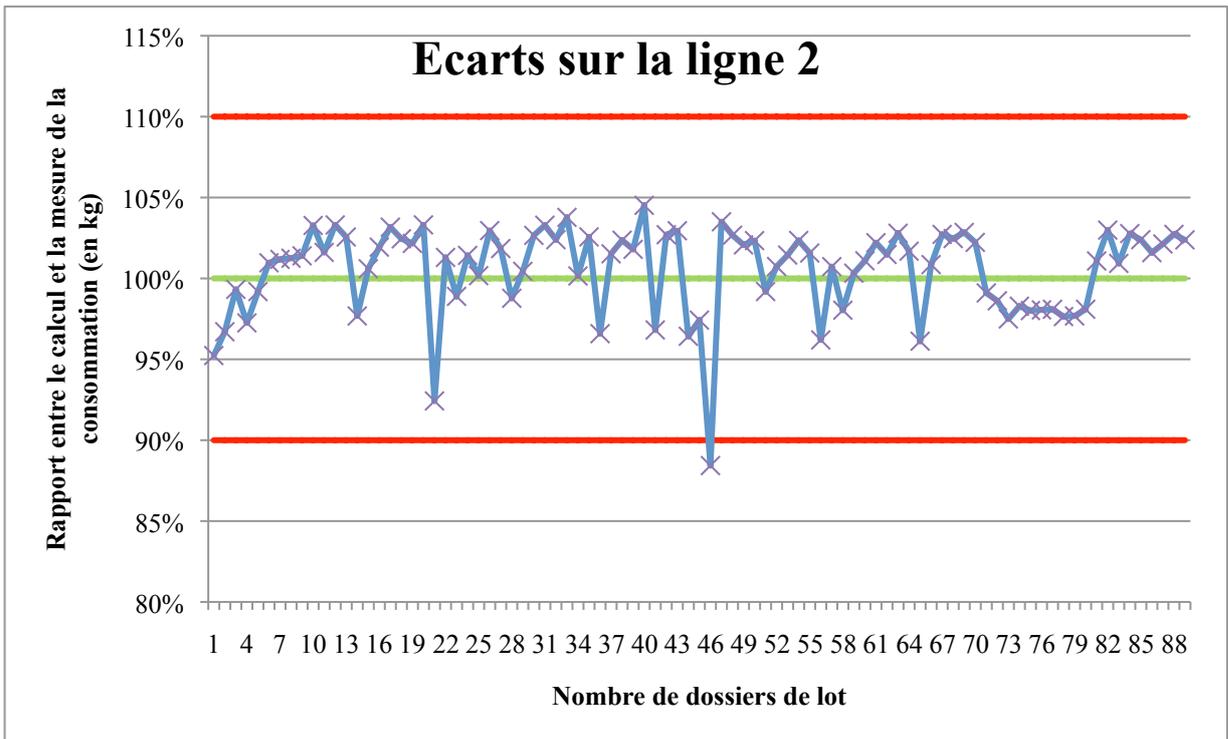


Figure 42. Les écarts sur la ligne 2, depuis le début de l'année 2012

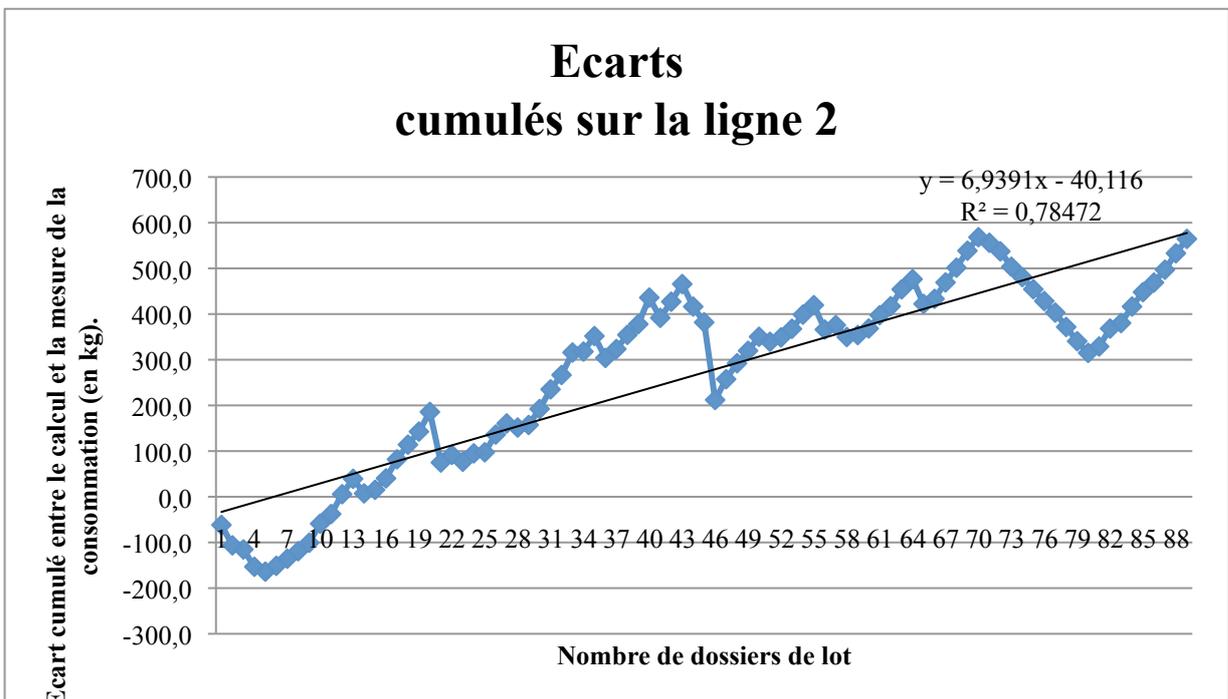


Figure 43. Les écarts cumulé sur la ligne 2, depuis le début de l'année 2012

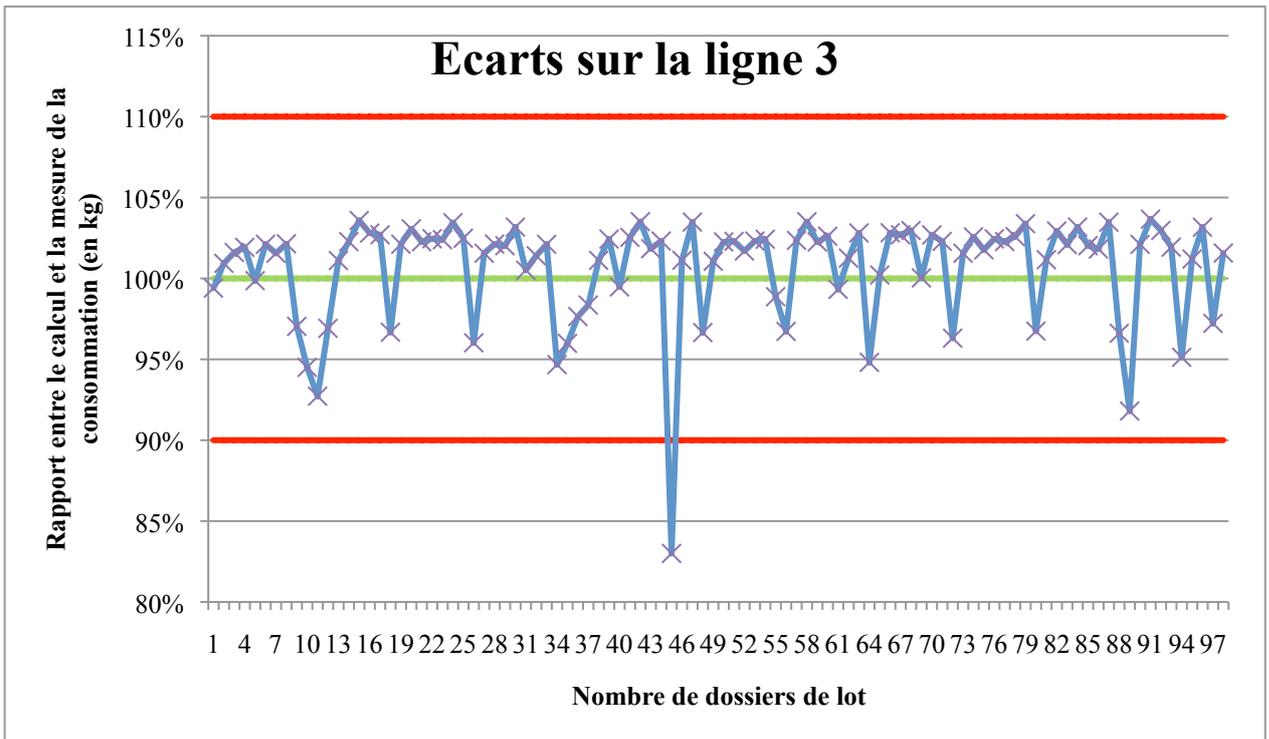


Figure 44. Les écarts sur la ligne 3, depuis le début de l'année 2012

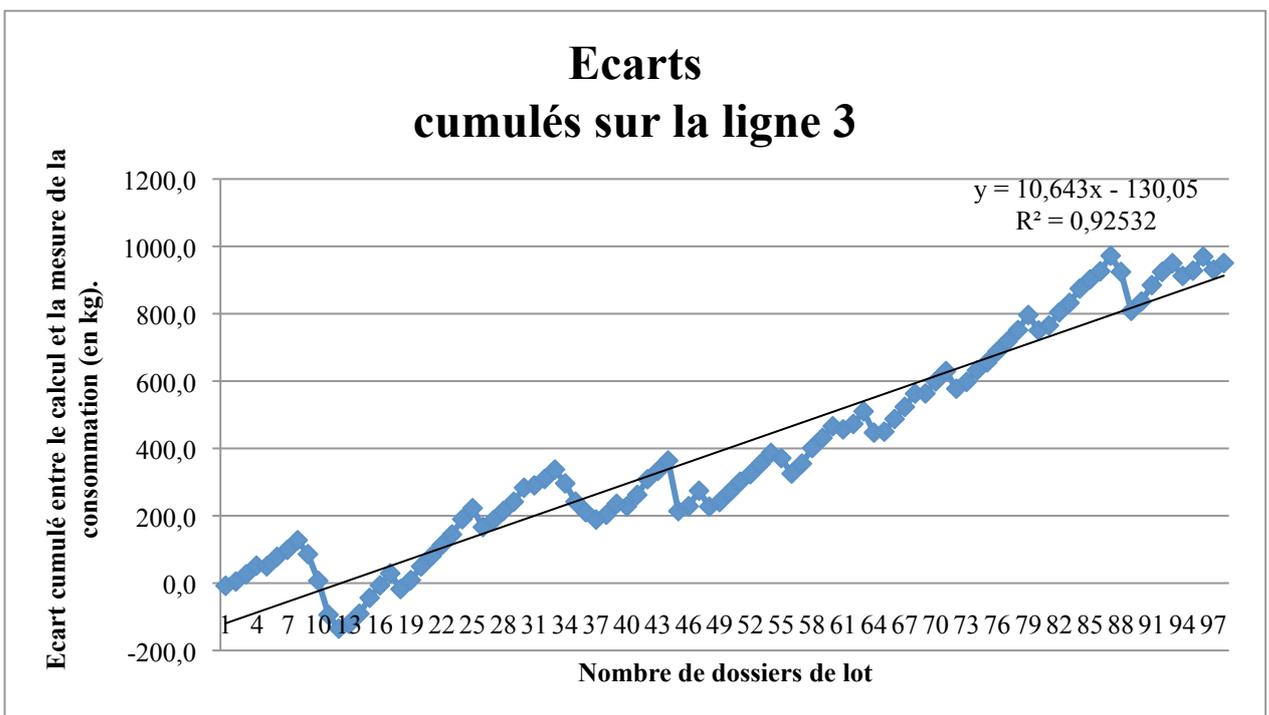


Figure 45. Les écarts cumulé sur la ligne 3, depuis le début de l'année 2012

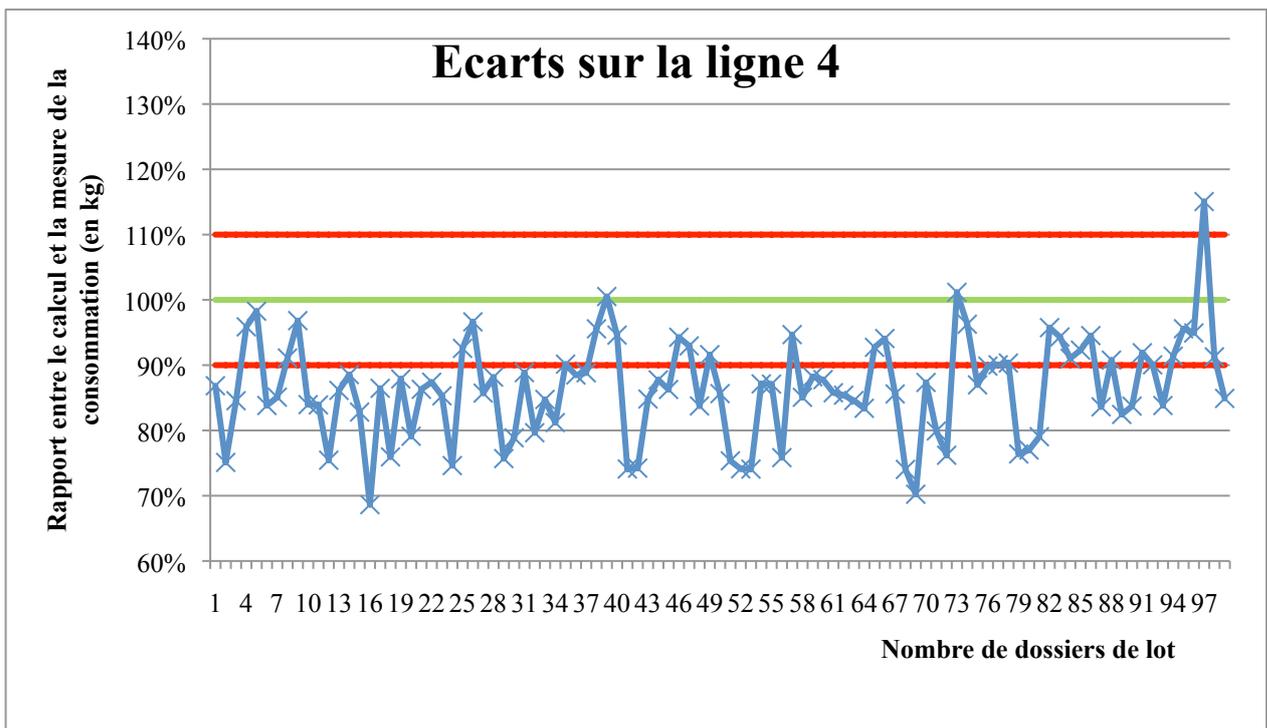


Figure 46. Les écarts sur la ligne 4, depuis le début de l'année 2012

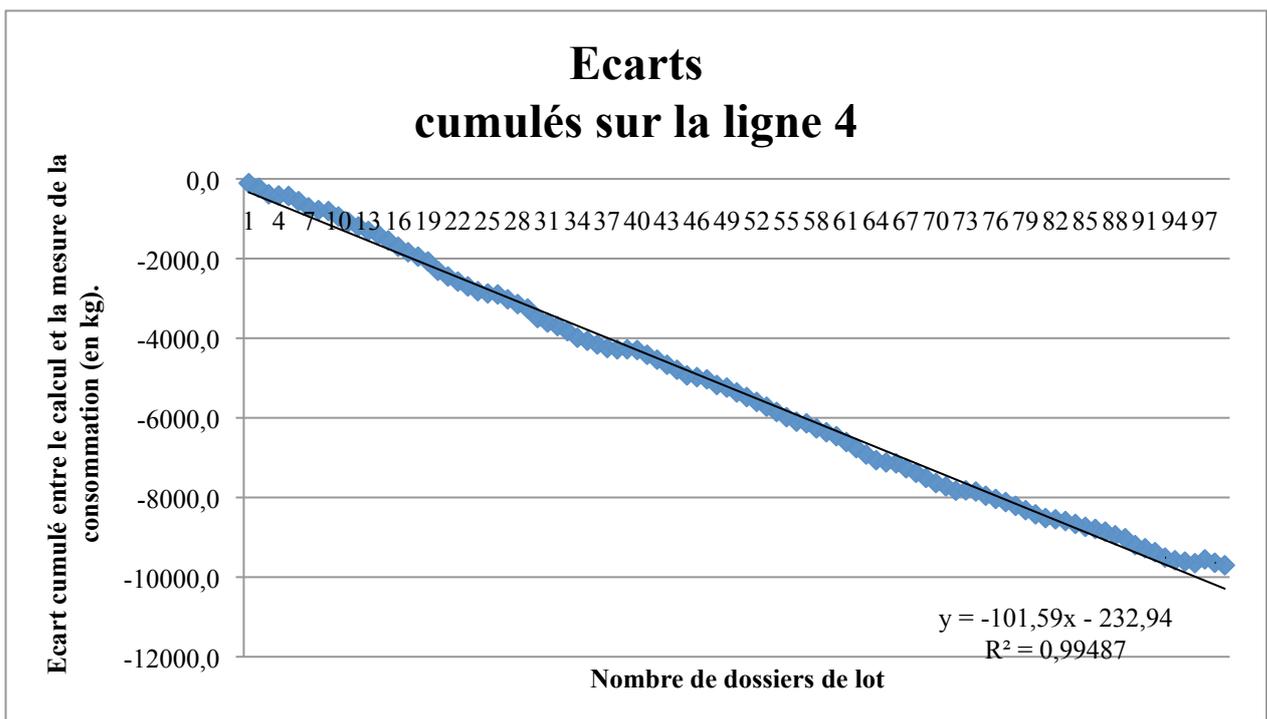


Figure 47. Les écarts cumulés sur la ligne 4, depuis le début de l'année 2012

Les écarts sont ensuite classés afin d'identifier, s'il s'agit d'un manque de précision du débitmètre, ou un défaut de calibration (figures 48, 49, 50 et 51).

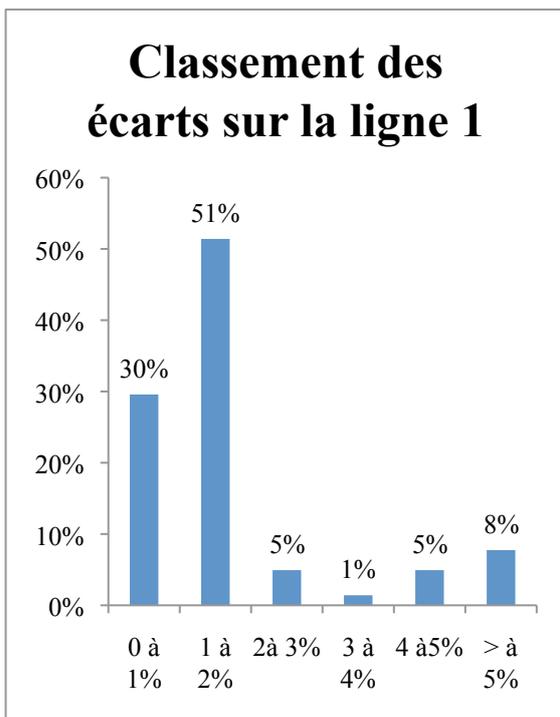


Figure 48. Répartition des écarts sur la ligne 1

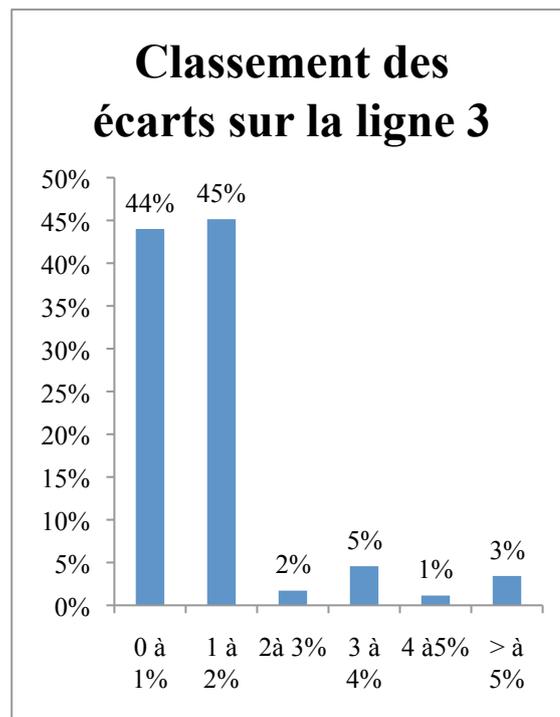


Figure 50. Répartition des écarts sur la ligne 3

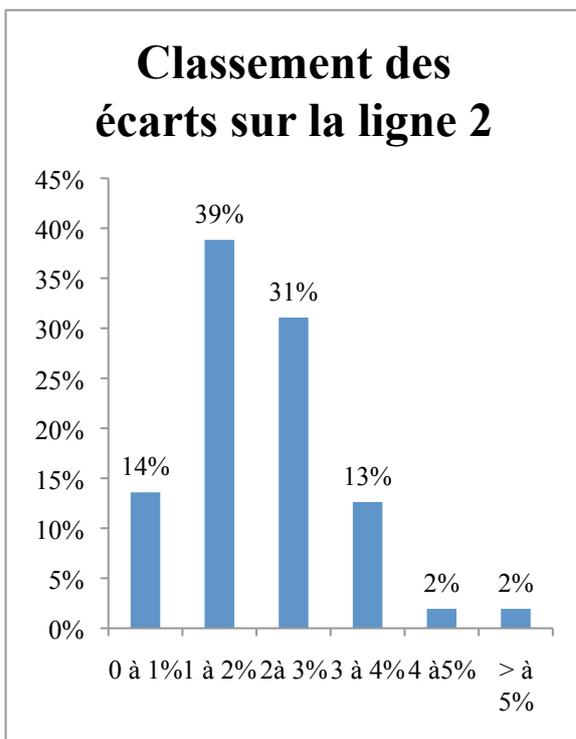


Figure 49. Répartition des écarts sur la ligne 2

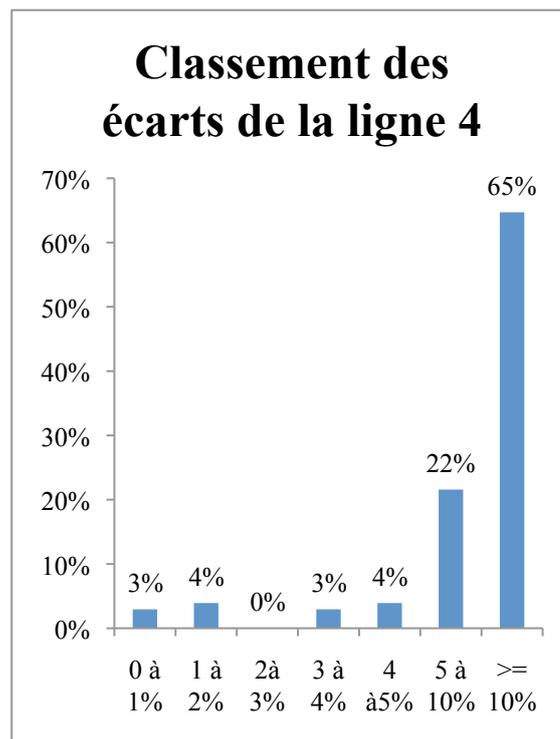


Figure 51. Répartition des écarts sur la ligne 4

- Analyse du deuxième secteur.

Les écarts permettent de constater les dérives :

- Pour la ligne 1, le cumulé indique que la ligne a tendance, à surestimer la consommation.
- Sur la ligne 2 et 3, le cumulé permet de constater, que les lignes sous-estiment leurs consommations.
- Enfin, la ligne 4 est particulière, car les écarts cumulés sont, à la fois plus importants et linéaires.

Les points intéressants des résultats :

Les profils sont différents selon les lignes. Cela permet d'en déduire que chacune d'entre elles est indépendante. De plus, cela permet d'exclure tout le secteur 1, qui alimente chacune des cuves. La variation viendrait d'un élément sur les lignes de remplissage. Les débitmètres et les pesons de cuve sont les seuls outils de mesure, capables de fournir une donnée de consommation par ligne.

Le fait est qu'actuellement, les débitmètres sont les seuls outils à fournir la consommation des lignes. Donc, nous pourrions en déduire, que les valeurs des débitmètres seraient erronées.

Les écarts cumulés sur les lignes 1, 2 et 3 sont toujours inférieurs à 10%. Sachant que la limite de précision des débitmètres est de 10%, la déduction est qu'il ne s'agit pas d'une erreur de calibration, mais d'un manque de précision.

Cependant, ces écarts cumulés se compensent entre ces 3 lignes. On ne peut donc pas leur attribuer la cause des écarts de stock.

En revanche, les écarts de la ligne 4 sont supérieurs à 10% dans 65% des cas. Par conséquent, la déduction est que le débitmètre serait mal calibré.

Après consultation des relevés de métrologie, il s'avère que le débitmètre de la ligne 4, n'a pas été contrôlé depuis 2010.

f) Identification de la cause racine.

A la suite des analyses, la cause racine des écarts, entre la quantité initiale de gaz et la consommation, est donc liée à une dérive du débitmètre de la ligne 4 au cours du temps.

En revanche, le fait que le débitmètre surestime la consommation de 9 tonnes, ne correspond *a priori* pas, avec les résultats attendus, à savoir une sous estimation.

Si nous prenons le calcul de réconciliation comme donnée de référence, nous nous apercevons que l'écart, entre la donnée d'entrée et celle de sortie, serait encore supérieur, à celui utilisant la mesure du débitmètre.

Pour expliquer ce résultat, l'hypothèse la plus probable serait, que les réajustements réalisés après chacune des utilisations des cuves extérieures, influeraient sur les résultats.

3.2.3 Les innovations.

- a) Identifier les solutions possibles.

Les solutions envisagées sont :

- Faire un contrôle de métrologie, sur le débitmètre de la ligne 4.
- Changer les débitmètres, afin d'améliorer leur sensibilité et leur justesse.

La linéarité dans la dérive des écarts pourrait être équilibrée, par une calibration plus précise. Une ligne pilote telle que la ligne 4, conviendrait à cette solution.

Dans le cas où, la ligne pilote n'apporterait pas les résultats attendus, la solution alternative serait de changer les débitmètres actuels, pour d'autres plus performants.

- b) Etablir et mettre en œuvre un plan d'action.

La planification dépendra de la disponibilité de la production. Il faut prévoir d'intervenir lors d'une maintenance préventive. Pour cela, il faut consulter la logistique, pour obtenir les créneaux d'interventions.

- c) Mesure de l'activité de l'amélioration.

La mesure se fera selon la même méthode, que décrite précédemment. Cela permettra de comparer les résultats de la nouvelle situation, avec ceux de la situation actuelle.

3.2.4 Les contrôles.

- Effectuer une revue après la mise en place de l'amélioration.

Les mesures de la future situation doivent permettre de diminuer les écarts, entre la valeur dépotée et les données de consommation des débitmètres. Dans le cas contraire, les débitmètres devront être changés, pour d'autres plus performants.

- Valider les modifications.

Les travaux doivent être ensuite validés par la Direction, afin de lancer les améliorations sur les autres lignes.

3.2.5 Les conclusions du projet.

Ce projet d'optimisation de la gestion de stock en gaz propulseur a pu être réalisé, grâce à la collaboration et les connaissances de l'ensemble des acteurs du projet. Il a également demandé un véritable investissement de la part de chacun, afin d'identifier la cause racine.

L'amélioration du débitmètre défaillant et les contrôles de cette amélioration, sont actuellement en cours. Lorsque ces contrôles apporteront la preuve que le débitmètre mesure la consommation réelle, d'autres améliorations pourront être étudiées.

Pour cela, l'ensemble du processus de gestion du gaz a été revu, et de nombreux autres points d'amélioration ont été relevés. Par conséquent, nous pouvons aisément conclure que cette gestion peut, encore et toujours, être améliorée.

Ce projet n'a pas permis de diminuer physiquement la consommation de gaz propulseur. En revanche, il a corrigé les consommations erronées, dans le bilan carbone de l'entreprise, mais également dans son bilan financier.

Nous pouvons maintenant nous intéresser aux autres projets, visant à réduire la consommation de gaz propulseur. Dans cette partie, les plans directeurs des autres projets seront présentés, en vue d'apprécier l'intégralité d'une action écologique industrielle.

4 Les autres projets visant à diminuer les émissions de gaz à effet de serre.

Ce chapitre a pour objectif de décrire les plans directeurs et les autres projets, qui complètent cette action écologique et économique.

4.1 Le plan directeur du projet : L'optimisation des procédés de rinçage et de nettoyage.

4.1.1 Le contexte du projet.

Le processus de rinçage et de nettoyage des lignes de remplissage a été établi, il a plus de 10 ans. Ce processus est long et contraignant, mais indispensable, afin de garantir l'absence de contamination sur les produits finis.

Ce projet a pu commencer en Février 2012, dirigé par le service de validation du site de production.

A l'heure actuelle, le processus de nettoyage et de rinçage validé, est réalisé en quatre étapes, présentes dans le tableau 10.

Tableau 10. Processus de rinçage et de nettoyage actuel

Etape	Opération	Quantité de solvant ou de gaz propulseur, utilisée (en kg)
1	5 cycles de nettoyage au solvant	100
2	3 rinçages avec du gaz propulseur	90
3	2 cycles de nettoyage au solvant	40
4	8 rinçages au gaz propulseur.	240
Total	18 opérations	450

4.1.2 Les objectifs.

L'objectif du processus optimisé est, de diminuer le nombre de cycles de nettoyage et de rinçage, présenté dans le tableau 11.

Tableau 11. Processus de rinçage et de nettoyage optimisé

Etape	Opération	Quantité de solvant ou de gaz propulseur, utilisée (en kg)
1	3 cycles de nettoyage au solvant	60
2	1 rinçage avec du gaz propulseur	30
3	1 cycle de nettoyage au solvant	20
4	3 rinçages au gaz propulseur.	90
Total	8 opérations	200

La quantité de solvant et de gaz propulseurs reste toujours la même par cycle. Il s'agit seulement, du nombre de cycles qui diminue.

4.1.3 Les gains attendus.

Les gains estimés sont de trois types :

- Gain en gaz propulseurs : 517 500 €/an soit environ 65 000 kg/an.
- Gain en solvant : 118 990 €/an
- Gain de 20,5 jours de production/an

Les gains écologiques et économiques de ce projet seraient donc très importants. C'est pourquoi, il a été classé comme prioritaire.

4.1.4 Le périmètre du projet.

LIVRAISON GAZ PROPULSEUR

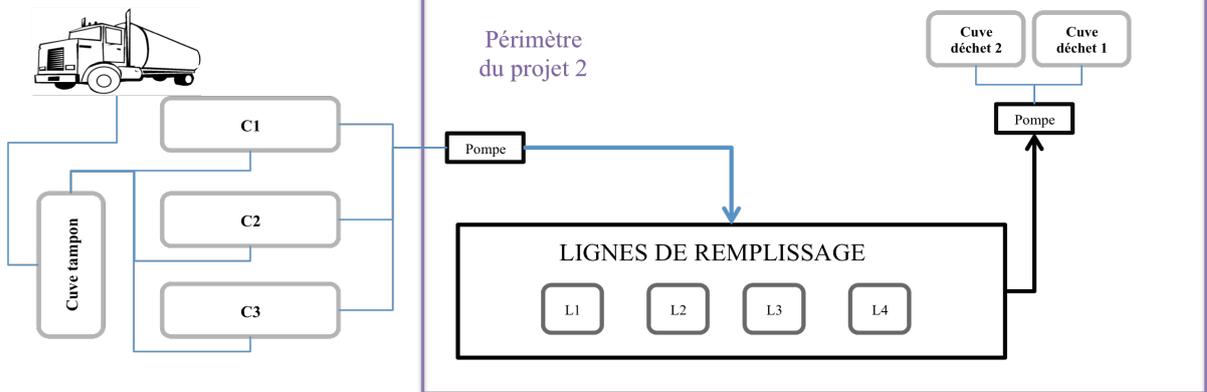


Figure 52. Périmètre du projet 2

Il comprend :

- Les lignes de remplissage,
- Les cuves déchets.

4.1.5 Les acteurs.

La direction a confié le projet à un chargé de projet de validation, expert en processus de nettoyage. Son rôle a été de définir, les nouvelles normes de nettoyage et de proposer un Protocole de validation, pour un processus de nettoyage et de rinçage optimisé. Etant donné le statut prioritaire du projet, de nombreux autres services ont été mandatés, afin de l'aider dans l'accomplissement de ce projet.

Les services sont :

- La Production,
- La Qualité,
- La Logistique,
- Le Contrôle Qualité.

4.1.6 La méthode choisie.

La méthode utilisée, afin de valider un processus de nettoyage, est standardisée. Elle consiste à effectuer des tests sur ligne, en suivant un Protocole de validation. Celui-ci doit présenter les informations indispensables sur :

- Le milieu, où sont réalisés les tests,
- La méthode utilisée, pour les prélèvements,
- La main d'œuvre nécessaire aux tests,
- Les moyens indispensables, au déroulement de la validation,
- La matière utilisée pour effectuer les tests,
- Les critères d'acceptations des tests,

Une fois le Protocole accepté, une « campagne de validation » est engagée, en accord avec le planning de la production. Ces tests consistent à :

- Une recherche de produit, sur les surfaces,
- Une recherche de produit, dans les placébos,
- Une recherche de solvant, dans les placébos,
- La teneur en eau,
- Une recherche microbiologique.

Chaque test est nécessaire lors de la validation de nettoyage. Afin de comprendre leurs rôles, nous allons décrire rapidement, leurs intérêts.

a. Une recherche de produit sur les surfaces :

La recherche de produit sur les surfaces, sert à identifier les zones de rétention, où le nettoyage est inefficace. La ligne est donc ouverte, afin de réaliser ces prélèvements, à l'aide d'écouvillons. Les surfaces sont préalablement sélectionnées, en fonction de leurs criticités.

b. Une recherche de produit dans les placébos :

Ce prélèvement est le plus critique, car il permet de déterminer s'il existe une contamination croisée, ou le risque d'un surdosage. Le dosage est réalisé sur les placébos.

c. Une recherche de solvant dans les placébos :

Ce prélèvement n'est critique, que si le solvant est soumis à une réglementation particulière. Dans ce cas, ils servent à garantir, si la quantité résiduelle est inférieure à la « quantité résiduelle maximale tolérée », imposée par leur réglementation.

d. La teneur en eau :

Ce prélèvement n'est critique, que si le produit est sensible à l'hydrolyse, ou lorsqu'il est hygroscopique. Dans ce cas, la teneur en eau est dosée par des techniques spécifiques, telle celle de Karl Fisher.

e. Une recherche microbiologique :

Des analyses microbiologiques sont réalisées, lors d'une validation d'un processus de nettoyage. Dans le cas de cette validation, le gaz propulseur présente une propriété bactéricide. Ce qui diminue donc, la criticité de ce test.

La stratégie de validation consiste à effectuer 3 nettoyages consécutifs, selon le Protocole de nettoyage. Puis, les informations collectées seront analysées, et permettront de conclure à l'efficacité du nettoyage et des rinçages.

Ce projet est également, un élément important dans la diminution de consommation de gaz à effet de serre. Il montre que dans certains cas, les processus précédemment validés ne sont pas toujours en adéquation, avec une réduction des gaspillages de gaz propulseur.

De plus, il vise à diminuer l'utilisation des solvants, ou encore appelés « Composés Organiques Volatils » (COV). En France, ces composés sont réglementés, et leurs diminutions font également partie des objectifs environnementaux de l'entreprise.

Nous allons maintenant décrire un autre projet qui vise également, à diminuer les consommations excessives de gaz propulseur.

4.2 Le plan directeur du projet : L'optimisation d'une étape de production.

4.2.1 Le contexte du projet.

Lors du processus de remplissage, une étape consiste à purger la cartouche en gaz propulseur, avant de la remplir avec le produit. Initialement, cette étape était imposée par la réglementation des transports aériens. Elle imposait aux aérosols, de ne pas dépasser 14,97 bar à 55°C.

Depuis 2009, cette réglementation a été modifiée, et les aérosols inférieurs à 50 ml ne rentrent plus dans son domaine d'application.

Par conséquent, les contraintes du retrait de cette étape ont été étudiées. Les conclusions sont les suivantes :

- Le retrait de la purge pourrait entraîner une augmentation de la pression, à l'intérieur de la cartouche.
- Il pourrait également détériorer le produit, par phénomène d'oxydation (dû à l'augmentation de la quantité d'oxygène dans la cartouche.)

Une première étude a été réalisée en 2010, afin d'étudier les conséquences du retrait de cette étape, sur la qualité du produit. Les résultats ont démontré alors, que la qualité du produit n'était pas affectée par le retrait de la purge.

Malgré ces excellents résultats préliminaires, le retrait de la purge ne peut être envisageable dans un premier temps, à cause du coût engendré, par les modifications des dossiers réglementaires. Ce projet vise donc, à améliorer cette étape, en diminuant de 2/3 la quantité de gaz propulseur consommée.

4.2.2 Les objectifs.

L'objectif est de :

- Diminuer la consommation de gaz propulseur, dans le but de réduire l'empreinte carbone, et le gaspillage de gaz.

4.2.3 Les gains attendus.

Ce projet représente un gain d'environ 16 tonnes de gaz/an.
Cela correspondrait à un gain économique de 127 000 €/an.

4.2.4 Le périmètre du projet.

LIVRAISON GAZ PROPULSEUR

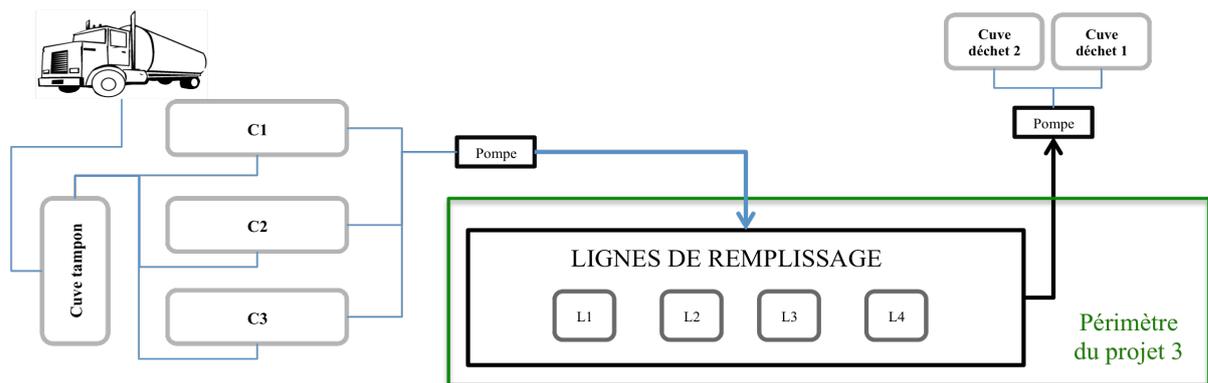


Figure 53. Périmètre du projet 3

Il comprend uniquement les lignes de remplissage.

4.2.5 Les acteurs.

La Direction a confié le projet à un chef de projet, au sein d'un service d'amélioration des processus de production. Afin de mener à bien son projet, de nombreux autres services participent également :

- La Production,
- La Qualité,
- La Logistique,
- Le Contrôle Qualité.

4.2.6 La méthode choisie.

La méthodologie utilisée est celle d'un Protocole expérimental.

Trois expériences sont alors requises, avec des quantités de gaz propulseur différentes, lors de l'étape de purge (tableau 12) :

Tableau 12. Expérimentation pour la réduction de la quantité de gaz propulseur, lors de l'étape de purge

Quantité de gaz propulseur, par rapport à la quantité initiale	Objectif du test
0%	Déterminer si l'absence de purge influe sur la qualité du produit
33%	Déterminer si 33% de la quantité initiale de gaz propulseur, influe sur la qualité du produit
100%	Définir une donnée de référence.

A cours de cette expérimentation, deux mesures sont étudiées.

- La quantité d'oxygène résiduelle
- La pression à l'intérieur de la cartouche.

Les données seront ensuite analysées, afin de conclure si cette réduction est possible.

A travers ce projet, l'importance de la revue du processus de fabrication, prend tout son sens. En effet, sans elle, la réduction de la consommation de gaz propulseur sur cette étape, n'aurait pu être envisagée. Ce projet illustre, pourquoi il est important de connaître le but de chaque étape, dans un procédé de production.

Ces quelques projets, montrent l'engagement d'une Entreprise Pharmaceutique, sur l'amélioration de son « empreinte carbone ». Ils démontrent également, que ces actions ont des intérêts économiques, en plus de ceux écologiques.

Ces projets sont basés essentiellement, sur l'amélioration de la consommation du gaz actuel. Les investissements menés, dans l'élaboration d'une nouvelle formulation, à partir d'un gaz moins polluant, devraient être importants. Néanmoins, ils seraient certainement plus que nécessaires dans la période actuelle, face à la taxe « Carbone » et à celle sur les Composés organiques volatils.

Les conséquences sanitaires et socio-économiques, attendues en raison, des perturbations climatiques, sont alarmistes. En tant qu'entreprises de Santé, l'Industrie Pharmaceutique se doit de poursuivre la mise en œuvre de projets, avec pour objectif, la protection de l'environnement.

INTERETS ECOLOGIQUES ET ECONOMIQUES D'UNE REDUCTION DES
EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE :
APPLICATION AUX AEROSOLS PHARMACEUTIQUES.

Conclusion

Au fil des années, les preuves d'un réchauffement climatique évolutif, se révèlent accablantes, et les conséquences sanitaires et sociales envisagées, de plus en plus alarmistes. Afin de maîtriser l'évolution de ces perturbations climatiques, le « Protocole de Kyôto » a été établi en 1997 et ratifié par la majorité des pays de la Planète en 2005. Depuis, il engage les pays industrialisés, à établir des plans d'actions, afin de diminuer leurs émissions de « gaz à effet de serre » anthropiques.

Face à ces engagements, l'Industrie Pharmaceutique se devait d'y participer, en établissant des projets d'améliorations, de son « empreinte carbone ». Pour elle, ces engagements environnementaux, peuvent être perçus comme une opportunité, afin d'envisager des projets d'amélioration et de recherches de gaspillage, à l'image du « Lean manufacturing ».

L'opportunité nous a été donnée d'aborder ce problème, à l'occasion d'un stage de fin d'études de Pharmacie Industrielle, dans une entreprise pharmaceutique internationale, spécialisée dans la production d'aérosols pharmaceutiques. Notre contribution a été d'optimiser la gestion de stock en gaz propulseur des aérosols, sachant qu'il s'agit d'un important « gaz à effet de serre ». Au cours de ce projet, un gain économique significatif s'est aussi révélé un atout à sa réalisation.

Bénéficiant des moyens techniques mis à notre disposition par l'entreprise, mais également, de l'aide du personnel hautement qualifié des lignes de production, nous avons pu rechercher les moyens d'améliorer cette gestion de stock, afin d'éviter les écarts.

L'investigation a été menée selon une méthodologie déductive, empruntée de la méthode du DMAIC.

Au terme de ces recherches, nous avons pu identifier « la cause racine » de ces écarts de stock, à savoir, la défaillance d'un outil de mesure, lors du processus mettant en œuvre le gaz propulseur. Des axes d'amélioration ont été définis, permettant alors, de réduire significativement, la consommation de ce gaz.

Ce projet s'inscrit dans un ensemble d'actions environnementales menées par l'entreprise, dans la recherche de la diminution des émissions de « gaz à effet de serre ». De nombreux autres projets, sont actuellement mis en œuvre, à l'image de l'optimisation du processus de rinçage et de nettoyage des lignes de production, ou encore, la revue du processus de fabrication. Ces solutions devraient permettre, d'évoluer vers une amélioration significative.

L'effort doit continuer afin de réduire l'empreinte carbone, jusqu'à envisager un remplacement du gaz actuel. D'importants investissements en recherche et industrialisation sont envisagés, suite aux études effectuées dans ce cadre.

Au regard de l'évolution constante des connaissances et des réglementations environnementales pour l'avenir de la Planète, ce type d'étude est appelé à se développer dans l'avenir et s'étendra certainement, à l'ensemble du secteur Industriel. En effet, les entreprises du médicament se doivent de construire des politiques environnementales cohérentes et en accord avec leur objectif de Santé.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Grenoble, le 08/11/2012

LE DOYEN


Professeur Christophe BIBLOT


LE PRESIDENT DE LA THESE


Professeur Aziz BAKRI

Bibliographie

1. Larousse. Larousse.fr. [Consulté le 07 10 2012]. Disponible en ligne: <http://www.larousse.fr/encyclopedie/nom-commun-nom/climat/34503>.
2. Delmas R, Chauzy S, Verstraete JM, Ferré H. Atmosphère, océan et climat.: belin Editions. 2007.
3. Olivieri J, Bessemoulin P. LE RAYONNEMENT SOLAIRE ET SA COMPOSANTE ULTRAVIOLETTE. 8^{ème} éd. La météorologie. Sept 2000 .
4. Berger A. Le Climat de la Terre. Un passé pour quel avenir ?: De Boeck Université. 1992.
5. GIEC. Changements climatiques 1995. Rapport d'évaluation du GIEC. Cambridge: Okanagan University College Canada. Université d'oxford. Agence américaine pour la protection de l'environnement (EPA), Section géographique. 1996.
6. Commission Européenne Antarctic Research a European Network for Astrophysics. Exploitation des observations Obtenues avec un sky Brightness monitor au dôme C. [Consulté le 10 10 2012]. Disponible en ligne: http://www.unice.fr/DeptPhys/sem6/Projets/SBM/D_un_point_de_vue_physique.html.
7. GIEC. Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse. Rapport de synthèse. Genève: OMM, PNUE. 2008.
8. Thibert JFeE. skieur0206. 1995 ; 2001. [Consulté le 15 09 2012]. Disponible en ligne: <http://skieur0206.kazeo.com/external/http://www.ecrins-parcnational.fr/actus/51-patrimoine/909-le-glacier-blanc-abandonne-le-bout-de-sa-langue-.html>.
9. Berger A. Le réchauffement Global et Kyoto en Europe. In France Cd, editor. Un monde meilleur pour tous - Projet réaliste ou rêve incensé ? Colloque européen 2006. Louvain-la-Neuve: Odile Jacob. 2008. p. 15-46.
10. Gouvernement du Québec. La croissance d'un arbre. 2001. [Consulté le 09 10 2012]. Disponible en ligne: <http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/echo-foret/mai2001/feuille/savoir/savoircroissance2.htm>.
11. GIEC. Bilan des changements climatiques : Les éléments scientifiques. Rapport de synthèse. Genève. Groupe de travail I du GIEC. 2001.
12. FELICE Pd. L'effet de serre , un changement climatique annoncé. 1^{ère} éd. L'Harmattan. 2001.
13. Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution atmosphérique. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France série sectorielles et analyses étendues. rapport de synthèse. Paris. Ministère de l'écologie du développement durable, des transports et des logements. 2012.
14. PETIT J.R, JOUZEL J. climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the vostok ice core Antarctica. Nature. 1999.
15. Arrhenius S. On the influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. 5^{ème} éd. The London, Edimbourg and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. 1896. p. 237-276.
16. . KEELING C.D, BACASTO R.B. Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii. Tellus. 1976. 28: p. 538-551.

17. National Oceanic & Atmospheric Administration. Earth System Research Laboratory Global Monitoring Division. 2012. [Consulté le 14 10 2012]. Disponible en ligne: ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/trends/co2_annmean_mlo.txt.
18. Organisation météorologique mondiale. Événements marquants. 2009. [Consulté le 10 10 2012]. Disponible en ligne: http://www.wmo.int/pages/about/milestones_fr.html.
19. Programme des Nations Unies pour l'Environnement. Manuel du Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone. 7^{ème} éd. Montréal: Secrétariat de l'ozone PNUE; 2006.
20. GIEC. Climate Change. rapport de synthèse. OMM/ UNEP. 1990.
21. Programme des Nations Unies pour l'environnement. l'environnement au service du développement. 2010. [Consulté le 10 10 2012]. Disponible en ligne: <http://www.unep.org/Documents.multilingual/Default.asp?DocumentID=43&ArticleID=242&l=fr>.
22. Organisation des Nations Unies. Protocole de Kyoto A la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Kyoto: Secrétariat des Nations Unies; 1997.
23. Bureau d'information pour les conventions du Programme des Nations Unies pour l'environnement pour le Secrétariat des changements climatiques. QUATRIEME SESSION DE LA CONFERENCE DES PARTIES DE LA CONVENTION-CADRE DES NATIONS UNIES SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES. Dans DOSSIER DE PRESSE BUENOS AIRES 1998. 1998.
24. Sénat. Sénat, un site au service des citoyens. 2002. [Consulté le 16 10 2012]. Disponible en ligne: <http://www.senat.fr/rap/r01-224-1/r01-224-181.html>.
25. RTFLASH Recherche et Technologie. RTFLASH Recherche et Technologie. 2001. [Consulté le 14 10 2012]. Disponible en ligne: <http://www.rtflash.fr/l-academie-sciences-americaine-confirme-rechauffement-climatique/article>.
26. Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. Energie, Air et Climat. 2012. [Consulté le 15 10 2012]. Disponible en ligne: <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-accords-de-Bonn-et-Marrakech.html>.
27. UNFCCC. REPORT OF THE CONFERENCE OF THE PARTIES ON ITS EIGHTH SESSION, HELD AT NEW DELHI FROM 23 OCTOBER TO 1 NOVEMBER 2002. In PART TWO: ACTION TAKEN BY THE CONFERENCE OF THE PARTIES AT ITS EIGHTH SESSION. 2002. New Delhi. p. 36.
28. Nations Unies. Agir sur les changements climatiques: Portain du système des Nations Unies. 2012 [Consulté le 15 10 2012]. Disponible en ligne: <http://www.un.org/fr/climatechange/kyoto.shtml>.
29. United Nations Framework Convention on Climate Change. United Nations Framework Convention on Climate Change. 2012 [Consulté le 15 10 2012]. Disponible en ligne: http://unfccc.int/meetings/montreal_nov_2005/meeting/6329.php.
30. Stern N. The Economics of Climate Change: The Stern Review: Cambridge. 2006.
31. unfccc. United Nations Framework Convention on Climate Change. 2009. [Consulté le 16 10 2012]. Disponible en ligne: http://unfccc.int/portal_francophone/essential_background/kyoto_protocol/status_of_ratification/items/3346.php.
32. Unfccc. Unfccc. 2009. [Consulté le 01 10 2012]. Disponible en ligne: unfccc.int/resource/docs/2009/cop15/fre/11a01f.pdf.
33. Unfccc. Unfccc. 2010. [Consulté le 01 10 2012]. Disponible en ligne: http://unfccc.int/meetings/cancun_nov_2010/items/6005.php.

34. Unfccc. Unfccc. 2011. [Consulté le 01 10 2012]. Disponible en ligne: http://unfccc.int/meetings/durban_nov_2011/meeting/6245.php.
35. L'express. L'express. 2011. [Consulté le 26 10 2012]. Disponible en ligne: http://www.lexpress.fr/actualite/environnement/le-canada-se-retire-du-protocole-de-kyoto_1060859.html.
36. Robinson A. Global Warming petition project. 1998. [Consulté le 19 10 2012]. Disponible en ligne: <http://www.oism.org/pproject/>.
37. Nations Unies. Site officiel des Nations Unies sur les indicateur OMD. 2012. [Consulté le 16 10 2012]. Disponible en ligne: <http://mdgs.un.org/unsd/mdg/Search.aspx?q=CO2>.
38. United Nations. United Nations Framework Convention on Climate Change. [Consulté le 16 10 2012]. Disponible en ligne: http://unfccc.int/portal_francofone/essential_background/feeling_the_heat/items/3294.php.
39. Kandel R. Kyôto, un pas vers la stabilisation de l'effet de serre ?. Dans Universalis E. La science au présent. 1999. Encyclopaedia Universalis p. 176-181.
40. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEPP. Les mécanismes de flexibilité du Protocole de Kyoto. 2004.
41. Llopis AP. European Society of International Law. 2005. [Consulté le 19 10 2012]. Disponible en ligne: www.esil-sedi.eu/fichiers/en/PeyroLlopis_362.pdf.
42. Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. Le grenelle environnement. [Consulté le 26 10 2012]. Disponible en ligne: <http://www.legrenelle-environnement.fr/-Processus-du-Grenelle-.html>.
43. Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie. Décret n° 98-817 du 11/09/98 relatif aux rendements minimaux et à l'équipement des chaudières de puissance comprise entre 400 kW et 50 MW. 1998. [Consulté le 25 10 2012]. Disponible en ligne: http://www.ineris.fr/aida/consultation_document/10317.
44. Le Parlement européen et le Conseil de l'Union Européenne. Directive 2006/40/CE du Parlement européen et du Conseil du 17 mai 2006 concernant les émissions provenant des systèmes de climatisation des véhicules à moteur et modifiant la directive 70/156/CEE du Conseil (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). Journal officiel des Communautés européennes. 14 juin 2006.
45. Pharmacopée européenne. Pharmacopée européenne 7^{ème} édition. 7^{ème} éd.
46. Dehon service SA. climalife. 2012. [Consulté le 05 03 2012]. Disponible en ligne: www.climate.dehon.fr/uploads/media/3/235/235_353_r134a-fd-fr-08-pdf.pdf.
47. DMAIC tools, six sigma training resources. DMAIC Tools. [Consulté le 20 04 2012]. Disponible en ligne: http://www.dmaictools.com/?utm_expnid=18088366-3.
48. Nations Unies. PROTOCOLE DE KYOTO À LA CONVENTION-CADRE DES NATIONS UNIES SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES Kyoto. 1998.

Annexes

Annexe A : Pays industrialisés inscrit en annexe du Protocole de Kyôto. (48)

Annexe B : Exemples des principales technologies d'atténuation, des politiques et mesures connexes et des conditions favorables ou défavorables à leur application, par secteur. (7)

Annexe A : Pays industrialisés inscrits en annexe du Protocole de Kyôto.

Annexe B

<u>Partie</u>	<u>Engagements chiffrés de limitation ou de réduction des émissions</u> (en pourcentage des émissions de l'année ou de la période de référence)
Allemagne	92
Australie	108
Autriche	92
Belgique	92
Bulgarie**	92
Canada	94
Communauté européenne	92
Croatie*	95
Danemark	92
Espagne	92
Estonie*	92
États-Unis d'Amérique	93
Fédération de Russie*	100
Finlande	92
France	92
Grèce	92
Hongrie*	94
Irlande	92
Islande	110
Italie	92
Japon	94
Lettonie*	92
Liechtenstein	92
Lituanie*	92
Luxembourg	92
Monaco	92
Norvège	101
Nouvelle-Zélande	100
Pays-Bas	92
Pologne*	94
Portugal	92
République tchèque*	92
Roumanie*	92
Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord	92
Slovaquie*	92
Slovénie*	92
Suède	92
Suisse	92
Ukraine*	100

* Pays en transition vers une économie de marché.

Annexe B : Exemples des principales technologies d'atténuation, des politiques et mesures connexes et des conditions favorables ou défavorables à leur application, par secteur.

Tableau 13. Exemples des principales technologies d'atténuation, des politiques et mesures connexes et des conditions favorables ou défavorables, à leur application par secteur

Secteurs	Principales technologies et méthodes d'atténuation déjà sur le marché. Principales technologies et méthodes d'atténuation qui devraient être commercialisées d'ici 2030	Politiques, mesures et instruments ayant fait la preuve de leur efficacité sur le plan de l'environnement	Principales conditions favorables ou défavorables
Approvisionnement énergétique	Amélioration de la production et de la distribution ; passage du charbon au gaz ; énergie nucléaire ; sources d'énergie renouvelables (hydroélectricité, énergie solaire et éolienne, géothermie, bioénergie) ; cogénération ; premières applications de la technique de piégeage et de stockage du dioxyde de carbone (PSC) (p. ex. stockage du CO ₂ extrait du gaz naturel) ; PSC dans les centrales électriques fonctionnant au gaz, à la biomasse et au charbon ; énergie nucléaire de pointe ; énergies renouvelables de pointe, y compris	Réduction des subventions visant les combustibles fossiles ; taxes sur les combustibles fossiles ou redevances sur le carbone	La résistance des intérêts en place peut rendre l'application difficile
		Droits préférentiels pour les technologies basées sur les énergies renouvelables ; obligation d'utiliser les énergies renouvelables ; subventions aux producteurs	Peut aider à créer un marché pour les technologies moins polluantes
Transports	Véhicules offrant un meilleur rendement énergétique ; véhicules hybrides ; véhicules diesel moins polluants ; biocarburants ; passage du transport routier au transport ferroviaire et au transport en commun ; modes de déplacement non motorisés (bicyclette, marche) ; aménagement du territoire et planification des transports ; biocarburants de deuxième génération ; aéronefs plus performants ; véhicules électriques et hybrides de pointe dotés de batteries plus puissantes et plus fiables	Économie obligatoire de carburant ; mélange de biocarburants ; normes de CO ₂ pour le transport routier	L'efficacité peut être limitée si tout le parc automobile n'est pas visé
		Taxes à l'achat, l'enregistrement et l'utilisation de véhicules ; taxes sur les carburants ; tarification du réseau routier et du stationnement	L'efficacité peut être moindre si les revenus sont élevés
		Réduction des déplacements par l'aménagement du territoire et la planification de l'infrastructure ; investissement dans des installations de transport en commun pratiques et dans les modes de déplacement non motorisés	Convient particulièrement aux pays qui commencent à mettre en place leurs systèmes de transport
Bâtiments	Efficacité de l'éclairage et utilisation de la lumière naturelle ; meilleur rendement des appareils électriques et des systèmes de chauffage et de climatisation ; amélioration des cuisinières et de l'isolation ; utilisation active et passive de l'énergie	Normes et étiquetage des appareils	Nécessité de revoir régulièrement les normes
		Codes du bâtiment et certification	Intéressant pour les bâtiments neufs. L'application peut se révéler difficile

	solaire pour le chauffage et la climatisation ; fluides réfrigérants de substitution, récupération et recyclage des gaz fluorés ; conception intégrée des bâtiments commerciaux comprenant des techniques de contrôle et de rétroaction, tels les compteurs intelligents ; énergie solaire photovoltaïque intégrée aux bâtiments	Programmes de gestion de la demande	Réglementation requise pour que les entreprises de services publics puissent en bénéficier
		Initiatives du secteur public, y compris par les achats	Les achats du secteur public peuvent accroître la demande de produits à haut rendement énergétique
		Aide aux sociétés de services énergétiques	Facteur de succès : accès au financement par des tiers
Industrie	Équipement électrique (utilisation finale) plus efficace ; récupération de la chaleur et de l'énergie ; recyclage et remplacement des matériaux ; maîtrise des émissions de gaz autres que le CO ₂ ; multitude de technologies adaptées aux différents procédés ; efficacité énergétique améliorée ; PSC dans les usines de production de ciment, d'ammoniaque et de fer ; électrodes inertes pour la fabrication d'aluminium	Établissement de données de référence ; normes de rendement ; subventions, crédits d'impôt	Peut stimuler l'adoption de nouvelles technologies. La politique nationale doit être stable pour préserver la compétitivité à l'échelle internationale
		Permis échangeables	Mécanismes d'attribution prévisibles et signaux de stabilité des prix pour les investissements
		Accords volontaires	Facteurs de succès : objectifs précis, scénario de référence, contribution de tiers à la conception et à l'examen, règles formelles de suivi, coopération étroite entre le secteur public et privé
Agriculture	Meilleure gestion des terres arables et des pâturages afin de favoriser la fixation du carbone dans les sols ; remise en état des sols tourbeux cultivés et des terres dégradées ; amélioration de la riziculture et gestion du bétail et du fumier de manière à réduire les rejets de CH ₄ ; amélioration de l'épandage d'engrais azotés afin d'abaisser les émissions de N ₂ O ; culture de variétés destinées à remplacer les combustibles fossiles ; meilleure efficacité énergétique ; hausse du rendement des cultures	Incitations financières et règlements visant à améliorer la gestion des terres ; maintien de la teneur en carbone des sols ; utilisation efficace des engrais et de l'irrigation	Peut favoriser les synergies avec le développement durable et la réduction de la vulnérabilité à l'égard des changements climatiques, surmontant ainsi les obstacles à la mise en œuvre
Foresterie/ forêts	Boisement ; reboisement ; gestion forestière ; recul du déboisement ; gestion des produits forestiers et utilisation à la place des combustibles fossiles ; amélioration des essences afin d'accroître la productivité de la biomasse et la fixation du carbone ; affinement des techniques de télédétection servant à analyser le potentiel de fixation du carbone dans la végétation ou les sols et à cartographier les changements d'affectation des terres	Incitations financières (échelle nationale et internationale) visant à accroître la superficie boisée, ralentir le déboisement et préserver et gérer les forêts ; adoption et application de règlements sur l'utilisation des terres	Manque de capitaux d'investissement et questions relatives aux régimes fonciers. Peut contribuer à réduire la pauvreté

Déchets	Récupération du CH4 sur les sites d'enfouissement ; incinération des déchets avec récupération d'énergie ; compostage des matières organiques ; traitement contrôlé des eaux usées ; recyclage et minimisation des déchets ; couvertures et filtres biologiques destinés à optimiser l'oxydation du CH4	Incitations financières visant à améliorer la gestion des déchets et des eaux usées	Peut stimuler la diffusion des technologies
		Incitations financières ou obligation d'utiliser les énergies Renouvelables	Possibilité de se procurer localement des combustibles bon marché
		Réglementation de la gestion des déchets	Application très efficace au niveau national par le biais de stratégies coercitives



Serment de Galien



« Je jure en présence des Maîtres de la Faculté, des Conseillers de l'Ordre des Pharmaciens et de mes condisciples :

D'honorer ceux qui m'ont instruit(e) dans les préceptes de mon art et de leur témoigner ma reconnaissance en restant fidèle à leur enseignement.

D'exercer, dans l'intérêt de la santé publique, ma profession avec conscience et de respecter non seulement la législation en vigueur, mais aussi les règles de l'honneur, de la probité et du désintéressement.

De ne jamais oublier ma responsabilité et mes devoirs envers le malade et sa dignité humaine ; en aucun cas, je ne consentirai à utiliser mes connaissances et mon état pour corrompre les mœurs et favoriser des actes criminels.

Que les hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses. Que je sois couvert(e) d'opprobre et méprisé(e) de mes confrères si j'y manque ».