



**HAL**  
open science

# Réduction de l'impact écologique imputable aux gaz d'anesthésie au CHU de Bordeaux

Gauthier Gress

► **To cite this version:**

Gauthier Gress. Réduction de l'impact écologique imputable aux gaz d'anesthésie au CHU de Bordeaux. Sciences du Vivant [q-bio]. 2019. dumas-02418197

**HAL Id: dumas-02418197**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02418197>**

Submitted on 18 Dec 2019

**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.

**Université de Bordeaux**

**UFR Sciences Médicales**

Année 2019

Thèse n° 3012

Thèse pour l'obtention du

**DIPLOME d'Etat de DOCTEUR EN MEDECINE**

Spécialité Anesthésie Réanimation

Présentée et soutenue publiquement le 06 mars 2019

par

**Gauthier GRESS**

Né le 30/12/1991 à Montauban

Réduction de l'impact écologique imputable aux gaz d'anesthésie au CHU de Bordeaux
---------------------------------------------------------------------------------------

Directeur de thèse

Monsieur le Docteur Jean-Claude PAUCHARD

Jury

Madame le Professeur Karine NOUETTE-GAULAIN	Présidente
Madame le Professeur Hélène BELOEIL	Rapporteur
Monsieur le Professeur Alexandre OUATTARA	Juge
Monsieur le Professeur Matthieu BIAIS	Juge
Madame le Docteur Caroline HADJADJ	Juge
Monsieur le Docteur Jean-Claude PAUCHARD	Juge

# REMERCIEMENTS

A notre jury,

A notre Présidente de jury, Madame le Professeur Karine Nouette-Gaulain, vous me faites l'honneur de présider ce jury et de juger ce travail. Veuillez trouver ici l'expression de ma profonde reconnaissance aussi bien pour le temps consacré à la supervision de ce manuscrit que pour votre compagnonnage tout au long de ces années d'internat. Merci enfin pour votre bienveillance.

A notre Rapporteur, Madame le Professeur Hélène Beloeil, pour avoir accepté de juger de ce travail et pour vos remarques enrichissantes.

A Monsieur le Professeur Alexandre Ouattara, vous me faites l'honneur de siéger dans ce jury et de juger de ce travail. Soyez assuré de mon plus grand respect. Votre disponibilité, votre enthousiasme et votre rigueur sont pour moi de véritables modèles de probité. Je vous remercie également pour vos conseils et votre accompagnement dans mes travaux de référent des internes. Je suis très heureux de rejoindre votre équipe en fin d'internat pour poursuivre les travaux entrepris.

A Monsieur le Professeur Matthieu Biais, je te remercie d'avoir accepté de siéger dans ce jury et de juger ce travail. Ton dynamisme, ton professionnalisme et tes enseignements furent d'un très grand enrichissement personnel. Merci également pour cette si chaleureuse ambiance de travail que tu as su créer en neuro-réanimation.

A Madame le Docteur Caroline Hadjadj, vous me faites l'honneur de votre présence dans ce jury. Je vous remercie pour votre disponibilité et la qualité des informations transmises lors de la réalisation de ce travail. Soyez assurée de ma reconnaissance.

A mon directeur de thèse, Monsieur le Docteur Jean-Claude Pauchard, je te remercie infiniment. La réalisation de ce travail de thèse sous ta direction ainsi que l'apprentissage de l'anesthésie pédiatrique à tes côtés furent un véritable plaisir. Ta rigueur, ton professionnalisme et ton humanisme font de toi un modèle.

A mes proches,

A mes parents, sans qui rien de tout ceci n'eut été possible. Merci pour l'éducation que vous m'avez transmise et pour la confiance que vous avez placée en moi. Merci pour votre indéfectible soutien et votre infinie disponibilité. Je suis heureux de partager ce moment avec vous.

A mon frère Nathan et à ma sœur Gladys, je suis fier de vous savoir vous aussi engagés dans la voie des études médicales. Merci pour votre présence quotidienne, puisse celle-ci être éternelle et survivre à nos si belles années d'enfance.

A mes grands-parents Papou et Manou, ce travail vous est largement dédié. Votre constance et votre patience ont su éclairer ma voie. Je regrette que vous n'ayez pas pu être présents aujourd'hui.

A mon grand-père Paddy et à mon oncle Franck, je suis heureux que vous ayez pu faire le déplacement et fier de soutenir ce travail devant vous. Merci.

A Margot, à toi qui m'as accompagné depuis le début de mon internat. Je préfère citer ce poème de Pouchkine plutôt que de m'embarquer dans une longue célébration

*« Merci pour les plaisirs,  
Pour la tristesse et les tempêtes,  
Pour les souffrances délicieuses,  
Pour les fêtes et leurs folies,  
Pour tout ce que tu m'as donné,  
Merci »*

Eugène Onéguine, Alexandre Pouchkine

A mes amis palois (Kéké, Lulu, Clem, Diozi, Guitou, Aurel, Veddie, Devri, Roro, Remco & le Sab), vous qui fûtes toujours présents à mes côtés, je tiens à vous remercier. Vous êtes le terreau de mon accomplissement universitaire et professionnel. De belles fêtes nous attendent encore, gage à nous de les rendre aussi douces qu'elles l'ont toujours été.

A mes amis Santards (Pierrot, Roro, Market, Vassou, Max, Amar, Garcia, Guigui, Rory, Erwan, Léo, Tatane, Cousti, Chap-Chap et cie), cette parenthèse au nord de la Garonne fut une parenthèse enchantée. Je n'oublierai jamais nos folles aventures, pas moins que nos difficiles séances de révision ni les longues heures passées à vos côtés sur les bancs de la faculté. Vous faites partie des plus grands artisans de mon épanouissement professionnel et personnel, je vous en remercie.

A mes amis lyonnais et notamment à Alizée, Sofiane et Aldric, votre indéfectible soutien et vos sourires ont rendu ma D4 moins pénible. Merci pour tout.

Aux très belles rencontres réalisées depuis le début de cet internat bordelais,

A Alex, que la route fut belle à tes côtés depuis ce premier semestre montois ! Puisse nos chemins ne jamais diverger.

A Jules, mon ami chirurgien. Ta constante bonne humeur et ton rire contagieux font de toi le meilleur des camarades. Ces compliments valent également pour Lou.

A Geoffroy, mon autre ami non anesthésiste-réanimateur (encore que !). Certaines de nos discussions résonnent encore à mes oreilles. Merci pour ces soirées passées en compagnie d'Adrien, d'Armelle et de Margaux.

A Adrien l'antillais. Tu es absent aujourd'hui mais présent mon cœur. J'ai hâte d'avoir la chance de travailler bientôt à nouveau à tes côtés !

A Bastien et Corentin, mes autres camarades montois. Que d'orageuses soirées en votre compagnie !

A Stefano, mon co-référent et désormais ami. Merci pour ces réflexions communes, ces discussions philosophiques et le travail effectué à tes côtés.

A Max, Thibaut et Pierre, les soirées passées à vos côtés, fusse en garde ou dans les bars bordelais demeureront ancrées dans ma mémoire.

A Eva, merci de ton aide dans la réalisation du recueil de données à la source de ce travail. Merci également pour ton aide dans les prises de décision relevant de la référence du DES.

A mes co-internes (Jean, Marine, Claire, Cadet, Hugo, Myriem, Farès, Jérémy, Anissa, FX, Marion, Ariane, Grégoire, Timothée, Julie, Clément), mon internat n'eut pas été le même sans vous. Merci d'avoir été à mes côtés. Je n'oublierai jamais cet esprit de camaraderie.

Aux belles amitiés nées lors de mon excellent premier semestre et au cours de ceux qui suivirent, Coralie, Carla, Audrey et Nico, Doudou, Gaël et Giulia, Thomas et Manue, PL, la Vinche, Brice, Chloé et Fred, etc

A Thomas Leclerq, toi qui effectues désormais ton post-internat à Lyon, merci de m'avoir révélé cette magnifique spécialité qu'est l'anesthésie-réanimation alors que j'étais encore externe. Notre rencontre fut déterminante.

A Romain Griffier, qui a accepté de m'aider pour l'analyse statistique de ce travail.

A toutes les équipes médicales et paramédicales, merci pour vos enseignements, vos remarques et vos encouragements. Vous aussi êtes artisans de mon parcours, merci.

# TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION .....	3
1. Coût carbone des gaz d'anesthésie.....	3
2. Rappels pharmacocinétique (métabolisme) .....	3
3. « Pharmaco-écologie » des agents anesthésiques inhalés .....	4
<i>Pouvoir de réchauffement global (PRG)</i> .....	5
<i>Concentrations atmosphériques</i> .....	6
<i>Intérêt actuel autour de l'effet de serre et ozonique des activités humaines</i> .....	9
4. Vers une ventilation à bas débit de gaz frais ? .....	9
5. Vers une réduction de l'impact écologique imputable à l'anesthésie inhalatoire ? .....	11
6. Vers un bloc opératoire sans protoxyde d'azote (N <sub>2</sub> O) ? .....	11
OBJECTIFS DU TRAVAIL.....	12
ARTICLE ORIGINAL .....	13
ABSTRACT .....	15
KEY POINTS SUMMARY .....	16
INTRODUCTION.....	17
METHODS .....	18
Study population .....	18
The audit in three steps.....	18
Professional practice assessment.....	19
Management program implementation.....	19
End points .....	20
Halogenated agents consumption and ecological cost .....	21
Computer designed survey .....	21
Statistical analyses.....	21
RESULTS.....	23
Population .....	23
Primary outcome.....	23
Secondary outcomes .....	23
DISCUSSION .....	26
DISCUSSION .....	39
BIBLIOGRAPHIE.....	43
Serment d'Hippocrate .....	47

## ABREVIATIONS

EPP : Evaluation des pratiques professionnelles

CAMEPPS : Cellule d'aide méthodologique à l'évaluation des pratiques professionnelles et à la pertinence des soins

MAR : Médecin anesthésiste-réanimation

DESAR : interne d'anesthésie-réanimation

IADE : infirmier(e) anesthésiste diplômé d'Etat

DGF : Débit de gaz frais, exprimé en L/min

AINOC : anesthésie inhalée à objectif de concentration

PRG<sub>100</sub> : Potentiel de réchauffement global à 100 ans

FiO<sub>2</sub> : Fraction inspirée en oxygène, exprimée en %

EqCO<sub>2</sub> : équivalent CO<sub>2</sub>, unité de référence en matière d'effet de serre

CFC : chlorofluorocarbonés

COP : conférence des parties

GIEC : Groupe d'intérêt sur l'environnement et le climat

BIS : indice bi spectral

GES : gaz à effet de serre

SNC : système nerveux central

CRF : capacité résiduelle fonctionnelle

IRA : insuffisance rénale aigue

VO<sub>2</sub> : consommation en oxygène

RSE : Responsabilité Sociétale des Entreprises



# INTRODUCTION

En France, selon un audit conduit par la Société Française d'Anesthésie Réanimation (SFAR) en 2013, 70% des anesthésies générales sont entretenues sur un mode inhalatoire (3) notamment en raison de la facilité d'utilisation des agents halogénés (sevoflurane et desflurane) et du protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O). Cette facilité d'utilisation est basée sur les propriétés pharmacologiques de ces gaz d'anesthésie qui en font des médicaments présentant peu de répercussions hémodynamiques et respiratoires. Cette utilisation largement répandue devrait prendre en compte l'impact écologique imputable à ces gaz à effet de serre.

## 1. Coût carbone des gaz d'anesthésie

Le coût carbone des anesthésies inhalées provient d'une part de leurs propriétés physico-chimiques (longueur d'onde d'absorption des rayonnement infra-rouges, durée de vie atmosphérique, etc) qui en font des gaz à effet de serre (et de déplétion ozonique pour le N<sub>2</sub>O) et d'autre part de leurs émissions atmosphériques, lesquelles sont directement corrélées à leur mode d'administration par les respirateurs d'anesthésie.

## 2. Rappels pharmacocinétique

Les agents anesthésiques par inhalation sont utilisés sous forme de liquides avec un point d'ébullition voisin de la température ambiante. Le groupe des anesthésiques comprend différents hydrocarbures halogénés, obtenus par une évolution chimique (halogénéation par un atome lourd) de substances proches de l'éther : l'enflurane, l'isoflurane, le sévoflurane, le desflurane et l'halotane. Nous traiterons ici des deux anesthésiques utilisés en pratique quotidienne en France, le sevoflurane et le desflurane.

Les anesthésiques inhalés sont absorbés par voie respiratoire, diffusent dans le sang et arrivent sous forme dissoute à leurs sites d'action au niveau du système nerveux central (SNC). Ils sont quasi-totalement éliminés par voie pulmonaire.

L'absorption des anesthésiques inhalés est fonction de la fraction inspirée, de la capacité résiduelle fonctionnelle (CRF) et de la ventilation alvéolaire. Ces éléments aboutissent au cours de l'induction anesthésique à l'obtention d'une concentration alvéolaire en agent halogéné (AH). Cette concentration alvéolaire établie génère secondairement un gradient de pression alvéolo-capillaire en AH responsable d'une élévation de la concentration sanguine en AH (nulle initialement). L'AH est secondairement distribué au site effet (SNC) selon un modèle tricompartimental.

Le métabolisme des agents halogénés est négligeable. Pour les médicaments utilisés en pratique courante en France (sevoflurane et desflurane), il est respectivement de 2 à 5% et de 0,1%.

Ainsi lors de l'interruption de l'administration de l'agent inhalé, celui-ci est éliminé par voie respiratoire, et *in fine* émis dans l'atmosphère, sous forme principalement inchangée.

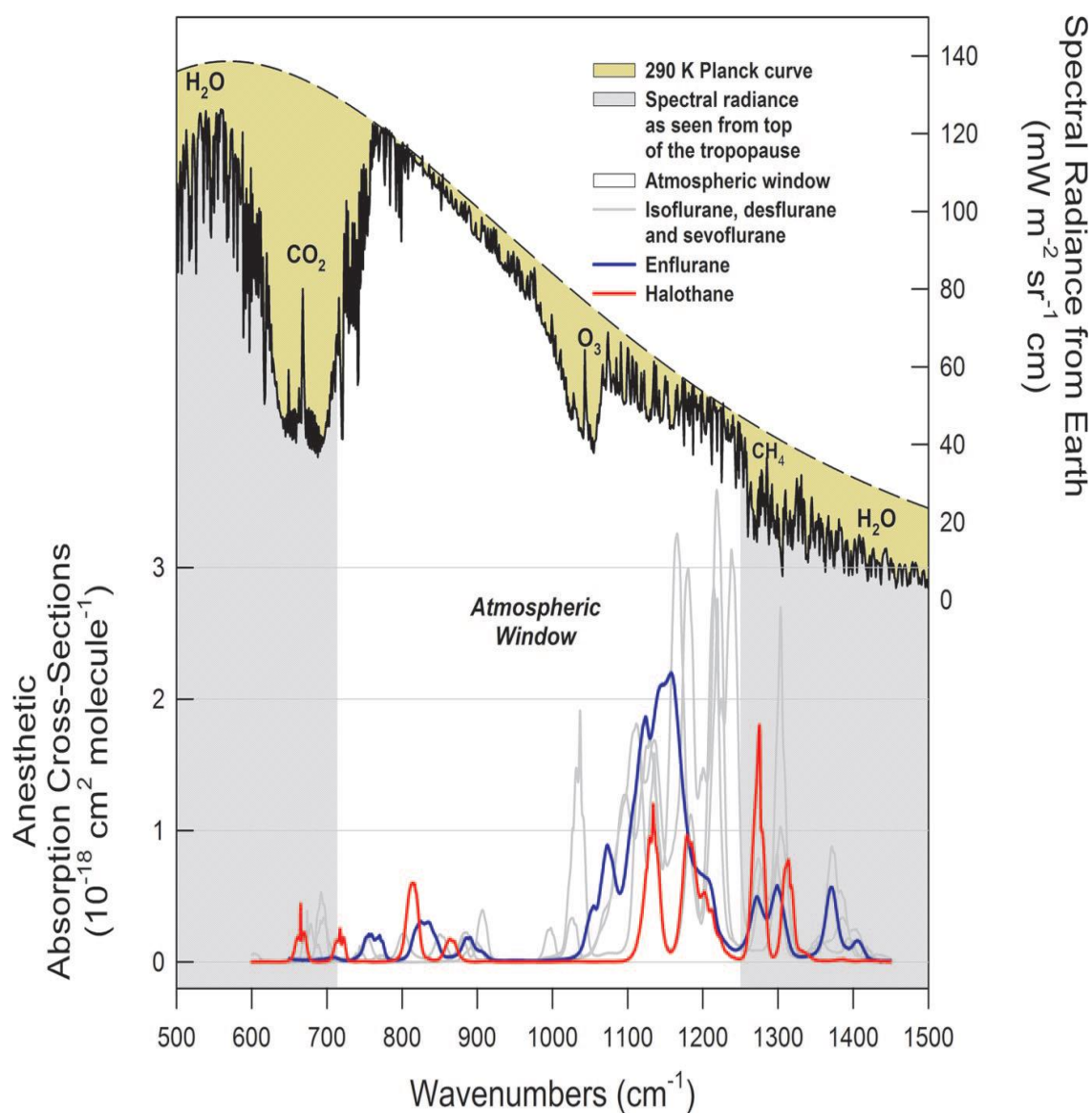
Le protoxyde d'azote est quant à lui un gaz anesthésique adjuvant développé au XIX<sup>e</sup> siècle. Ses propriétés anesthésiques sont représentées par un effet second gaz (13) (l'adjonction de N<sub>2</sub>O à un agent halogéné permet une diminution du délai d'induction ainsi qu'une diminution des posologies nécessaires en AH pour l'obtention d'une narcose compatible avec l'entretien de l'AG), un effet épargneur morphinique dans les douleurs de faible intensité et un effet antalgique intrinsèque.

### **3. « Pharmacologie » des agents anesthésiques inhalés**

Les caractéristiques physico-chimiques des agents halogénés et notamment la présence d'un atome halogéné dans leur structure chimique en font des gaz à effet de serre. Le protoxyde d'azote est également classé parmi les gaz à effet de serre (6).

## Pouvoir de réchauffement global (PRG)

Du fait de leur propriétés spectroscopiques, les gaz halogénés utilisés dans le domaine de l'anesthésie, au même titre que les composés chlorofluorocarbonés (CFC), sont responsables d'un effet de serre, se caractérisant par une capacité d'absorption et de réémission des infra-rouges dans le rayonnement terrestre (14,15). Cet effet de serre se décrit par le spectre d'absorption des infra-rouges (2,16), variable d'une molécule à l'autre.



Les experts internationaux dans le domaine s'accordent à quantifier le « poids carbone » de chaque gaz à effet de serre par le potentiel de réchauffement global à 100 ans (PRG<sub>100</sub>), exprimé en équivalent-CO<sub>2</sub> (EqCO<sub>2</sub>), comparé au dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), gaz à effet de serre de référence ayant un PRG<sub>100</sub> égal à 1. Le PRG<sub>100</sub> dépend des propriétés physicochimiques de la molécule ainsi que de sa durée de vie atmosphérique (17,18). Les valeurs des PRG<sub>100</sub> des gaz d'anesthésie sont représentées dans le tableau 1(2) :

Table 1. Summary of Radiative Properties, Atmospheric Lifetimes, and Global Warming Potentials for Nitrous Oxide and the Halogenated Anesthetic Gases						
Compound	Atmospheric lifetime (y)	Radiative efficiency (W m <sup>-2</sup> ppb <sup>-1</sup> )	GWP			Ozone depletion potential
			20-y time horizon	100-y time horizon	500-y time horizon	
Nitrous oxide, N <sub>2</sub> O	114 <sup>B</sup>	0.00303 <sup>B</sup>	289 <sup>B</sup>	298 <sup>B</sup>	153 <sup>B</sup>	0.017 <sup>17</sup>
Halothane, CF <sub>3</sub> CHClBr	1.0 <sup>B</sup>	0.165 <sup>A</sup>	190 <sup>A</sup>	50 <sup>A,B</sup>	20 <sup>A</sup>	0.4 <sup>A,C</sup>
Enflurane, CHFClCF <sub>2</sub> OCF <sub>2</sub> H	4.3 <sup>B</sup>	0.447 <sup>A</sup>	2370 <sup>A</sup>	680 <sup>A,D</sup>	210 <sup>A</sup>	0.01 <sup>A,C</sup>
Isoflurane, CF <sub>3</sub> CHClOCHF <sub>2</sub>	3.2 <sup>13</sup>	0.453 <sup>13</sup>	1800 <sup>13</sup>	510 <sup>13</sup>	160 <sup>13</sup>	0.01 <sup>A,C</sup>
Desflurane, CF <sub>3</sub> CHFOCHF <sub>2</sub>	14 <sup>3</sup>	0.469 <sup>13</sup>	6810 <sup>3</sup>	2540 <sup>3</sup>	130 <sup>3</sup>	0 <sup>A,C</sup>
Sevoflurane, (CF <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CHOCH <sub>2</sub> F	1.1 <sup>3</sup>	0.351 <sup>13</sup>	440 <sup>3</sup>	130 <sup>3</sup>	40 <sup>3</sup>	0 <sup>A,C</sup>

Tableau 1. Potentiel de réchauffement global des agents d'anesthésie inhalée, d'après Sulbaek et al (2).

GWP100 : Global Warming Potential 100 years, valeur de référence

Concernant les principaux gaz d'anesthésie utilisés dans les pays industrialisés, le PRG<sub>100</sub> du desflurane (C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>F<sub>6</sub>O) à 2540 est le plus important, près de 20 fois supérieur à celui du sevoflurane (C<sub>4</sub>H<sub>3</sub>F<sub>7</sub>O) à 130, faisant du desflurane le gaz d'anesthésie le plus polluant, tant d'un point de vue qualitatif que temporel.

### Concentrations atmosphériques

Les composés halogénés, bien que présents dans l'atmosphère à des concentrations bien inférieures à celle du CO<sub>2</sub>, sont responsables d'environ 10 à 15% de la contrainte radiative anthropique mondiale (2). La part des agents halogénés à usage médical dans cette concentration est marginale. Cependant, ainsi que le montrent Vollmer et al. dans des travaux réalisés en 2015 (19), les concentrations d'agents halogénés à usage médical (sevoflurane et desflurane) sont croissantes. Grâce à des mesures réalisées par spectrophotométrie de masse en plusieurs points du globe, notamment dans des zones éloignées des sources directes d'émission

(Pacifique Nord, station coréenne en Antarctique, Suisse), les auteurs ont pu objectiver les variations de concentration atmosphérique de ces gaz entre 2000 et 2014. Les résultats sont présentés dans les figures 2 et 3.

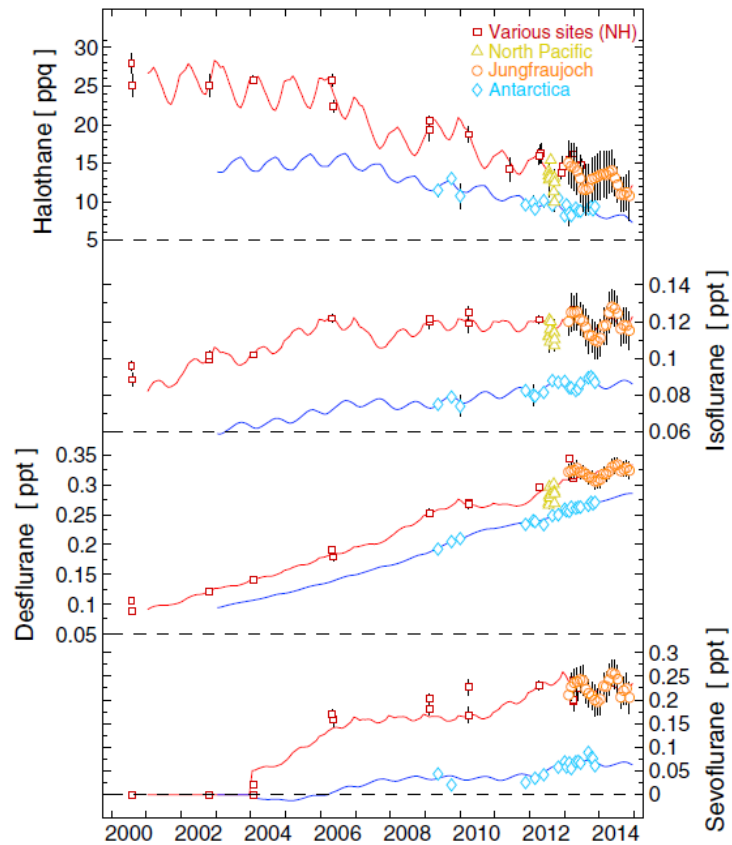


Figure 2. Evolution des concentrations (ppt) atmosphériques en agents halogénés entre 2000 et 2014, d'après Vollmer et al (19)

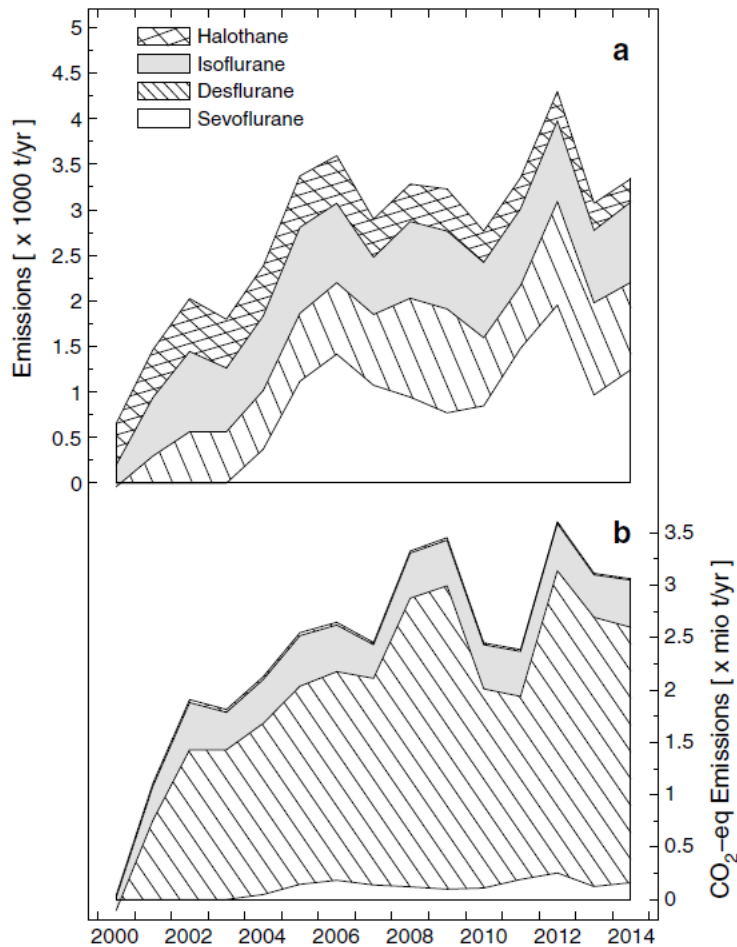


Figure 3. Evolution des émissions atmosphériques d'agents halogénés entre 2000 et 2014, d'après Vollmer et al (19)

Il existe une augmentation dans le temps des concentrations atmosphériques en AH, homogènes selon les sites de mesure, dues d'une part à l'augmentation du nombre d'actes réalisés sous anesthésie et d'autre part à l'effet rémanent dans l'atmosphère, proportionnel à la durée de vie atmosphérique. Il est intéressant de noter les variations temporelles de certaines molécules liées à leur début ou fin de commercialisation mais plus encore de mettre en lumière qu'actuellement, plus de 90% de la pollution atmosphérique par les gaz d'anesthésie provient du desflurane (Figure 3).

## *Intérêt actuel autour de l'effet de serre et ozonique des activités humaines*

Depuis 1995 et la première conférence des parties (COP) de Rio de Janeiro, les préoccupations mondiales autour de l'effet de serre et de la préservation de la couche d'ozone sont quotidiennes. Les travaux du Groupe d'intérêt sur l'environnement et le climat (GIEC) démontrent en effet avec certitude l'imputabilité de l'émission humaine de gaz à effet de serre dans la genèse et l'ampleur du dérèglement climatique et du réchauffement planétaire. Les accords de Montréal (7) en 1986 puis ceux de Kyoto (6) en 1997 encadrent les émissions de CFC, composés hautement polluants et dont la responsabilité sur l'effet de serre est désormais établie. Malgré la promulgation des accords de Montréal et de Kyoto, et ainsi que le démontre une publication récente dans Nature (20) qui retrouve une recrudescence des concentrations atmosphériques en CFC, les préoccupations environnementales autour des composés chlorofuorocarbonés persistent. Les agents halogénés à usage médical, bien qu'appartenant à la famille des CFC, du fait du service médical rendu, ne sont pas soumis à cette réglementation. Ils sont considérés comme responsables de 0,01% de la contrainte radiative anthropique (3). Ils sont par ailleurs responsables de près de 50% de la pollution induite par le fonctionnement des blocs opératoires (8,11), lesquels blocs opératoires sont considérés comme étant responsables de 20 à 30% de la pollution totale générée par les hôpitaux (21).

Aujourd'hui en France, les établissements de santé sont soumis à la Responsabilité Sociétale des Entreprises (RSE), au même titre que les autres acteurs des secteurs publics et privés. Ils ont donc légalement le devoir de mettre en œuvre un ensemble de mesures, exposées dans le rapport Bruntland (22), pour respecter les principes du développement durable et diminuer leur impact écologique.

### **4. Vers une ventilation à bas débit de gaz frais ?**

Pour réduire les consommations en agents halogénés, des concepts de ventilation mécanique à bas débit de gaz frais puis en boucle semi-fermée se sont progressivement imposés entre 2000 et 2010 (23). La ventilation mécanique et l'administration des AH à très bas DGF dite mode AINOC (Anesthésie INhalée à

Objectif de Concentration) repose sur trois piliers : la rapidité d'obtention des concentrations cibles en AH, l'ergonomie de l'utilisateur et les économies générées (9,10,24,25). Le mode AINOC présente également un avantage écologique puisqu'il permet de réduire les consommations en agents halogénés (9,10,24,25). Tay et al. ont mesuré une baisse de 44% du coût carbone des gaz d'anesthésie lors du remplacement du parc de respirateurs par des machines proposant le mode AINOC (diminution aussi de 27% du coût économique de consommation en gaz).

Ces avancées ont été rendues possibles par plusieurs considérations et résultats :

- L'absence quasi-totale de métabolisme des agents halogénés et leur élimination sous forme inchangée permet et justifie leur « recyclage » expiratoire et leur réutilisation en boucle fermée.
- En outre, il n'existe pas de preuve scientifique d'augmentation de l'incidence d'évènements indésirables associés à la ventilation à faible DGF et notamment pas de preuve en faveur d'une accumulation du composé A produit par la réaction du sevoflurane en contact avec la chaux sodée. Ces données retrouvées chez le rat (26) ne l'ont pas été chez l'homme et l'incidence d'insuffisance rénale aigue (IRA) est inchangée après ventilation péri-opératoire à bas DGF (27–29).
- De plus, des travaux déjà anciens (30) montrent que la consommation en oxygène ( $VO_2$ ) sous AG est abaissée. On estime ainsi que la  $VO_2$  sous AG est de 5mL/kg/min (21). Ainsi, pour un patient de 70kg, la  $VO_2$ /min théorique idéal serait de 350mL/min. Des travaux récents soulignent cette notion et mettent en avant les effets potentiellement néfastes de l'hyperoxie per-opératoire (31) tant dans le domaine de la chirurgie cardiaque (32,33) que dans celui de la chirurgie non cardiaque (34) avec notamment une tendance en faveur d'une augmentation des taux d'infection du site opératoire et de variations hémodynamiques régionales dans la chirurgie de pontage aortocoronarien (35). Des travaux en cours cherchent par ailleurs à mettre en évidence un lien entre hyperoxie per-opératoire et désordres cognitifs post-opératoires (36).
- Enfin l'évolution des respirateurs d'anesthésie et notamment l'existence de système permettant de prévenir l'obtention de mélanges hypoxiques tels que la technologie O<sub>2</sub> Guard (Maquet®) déclenchée à une  $F_{E}O_2$  à 20,5% et les



systèmes de « flush de sécurité d'O<sub>2</sub> » automatiques pour tous les respirateurs lorsque la F<sub>e</sub>O<sub>2</sub> devient inférieure à 17,5% autorisent une ventilation per-opératoire à faible DGF.

## **5. Vers une réduction de l'impact écologique imputable à l'anesthésie inhalatoire ?**

Deux leviers évidents permettent de diminuer le coût écologique de l'anesthésie inhalée : le choix judicieux de l'agent inhalé prenant en considération l'impact écologique de ce dernier et la diminution des consommations en AH via une réduction du DGF et/ou l'utilisation du mode AINOC.

Un troisième levier pourrait être celui du recyclage (en cours de développement) de ces agents très peu métabolisés. L'objectif serait de capter les AH à la sortie des respirateurs afin de les retraiter pour une nouvelle utilisation. Des dispositifs (DELTASORB<sup>®</sup>) existent et sont déjà commercialisés au Canada mais pas encore en France.

## **6. Vers un bloc opératoire sans protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) ?**

Nous avons vu précédemment les caractéristiques du N<sub>2</sub>O et son intérêt dans le contexte péri-opératoire. Ce gaz présente cependant de nombreux effets indésirables cliniques tant chez les patients (NVPO et toxicité neurologique) que chez les soignants (toxicité hématologique) retrouvés notamment dans les études ENIGMA et ENIGMA II (13,37). Il présente également des effets environnementaux néfastes puisqu'il s'agit à la fois d'un gaz à effet de serre mais également d'un gaz destructeur de la couche d'ozone (6).

Les indications à son utilisation au bloc opératoire sont aujourd'hui de plus en plus limitées et sa place dans les plateaux techniques modernes est soit abandonnée soit fortement remise en question (38,39).

## OBJECTIFS DU TRAVAIL

### Critère de jugement principal :

Réduction du débit de gaz frais moyen utilisé au cours de l'anesthésie générale

### Critères de jugement secondaires :

Fréquence d'utilisation du mode AINOC selon les phases de l'anesthésie

Réduction du réglage manuel moyen du DGF au cours de l'anesthésie générale

Réduction de la  $F_iO_2$  moyenne pour l'entretien de l'anesthésie générale

Réduction de l'utilisation du  $N_2O$  au cours de l'anesthésie générale

Analyse de régression logistique à la recherche de variables corrélées à un réglage du débit de gaz frais supérieur à 2L/min

Evaluation des connaissances des professionnels exerçant dans le domaine de l'anesthésie en matière de coût financier et de coût écologique des agents halogénés

## ARTICLE ORIGINAL

# How to reduce greenhouse gas release in daily clinical practice : an exemple from Bordeaux's University Hospital.

GRESS, Gauthier, \* ; PAUCHARD, Jean-Claude, MD\* ; NOEL, Eva, MD\* ; GRIFFIER, Romain, \* ; NOUETTE-GAULAIN, Karine, MD, PhD\*,<sup>†</sup>

\*CHU de Bordeaux, Service d'anesthésie Réanimation Pellegrin, Bordeaux, France

<sup>†</sup>Université de Bordeaux, Maladies Rares : Génétique et Métabolique, Bordeaux, France

Corresponding author : GRESS, Gauthier ; Anesthesiology and Critical Care Department, Hôpital Pellegrin, CHU de Bordeaux, Place Amélie Raba Léon, 33 076 BORDEAUX CEDEX, France ; [gauthier.gress@chu-bordeaux.fr](mailto:gauthier.gress@chu-bordeaux.fr), phone number : +33556795679

Financial disclosures: None

Conflicts of interest: None

World count:

Abstract: 202 words

Introduction: 342 words

Discussion: 856 words

Body of text: 1832 words

Authors contribution: GG supervised the conduct of the trail, helped to conceive the study, to record the data and to draft the manuscript. JCP helped to conceive the study, supervised the conduct of the trail and to draft the manuscript. EN helped to record the data. RG helped to analyse the data and to provide statistical advice. KNG helped

to provide statistical advice, supervised the conduct of the trial and to draft the manuscript. All authors read and approved the manuscript.

## ABSTRACT

*Background:* Volatile agents are worldwide daily used anesthetic agents. However, they are responsible for notorious greenhouse gas effect. No management program for reduction of volatile agents consumption and emission exists. The purpose of this study was to determine the effect of the implementation of a management program based on a multimodal strategy to reduce environmental impact of volatile agents.

*Methods:* We performed an audit of clinical practice before and after implementation of the management program. This program was based on a three-stage protocol including: 1) phase I: institutional practice phase based on a prospective observational study; 2) protocol implementation; 3) phase II: prospective observational study associated with feedback, scientific session and evaluation to guideline adherence. 350 procedures were included in Phase I and 420 in Phase II. We hypothesized that the management program implementation would lead to a reduction of greenhouse gas emission. The primary outcome was the reduction of mean fresh gas flow (FGF) used for maintenance of general anesthesia.

*Results:* The implementation of the management program led to a 35% reduction in mean FGF between the two phases ( $1.7 \pm 1.6$  L/min vs  $1.1 \pm 0.8$  L/min for Phase I and Phase II respectively,  $p < 0.001$ ). We found a 36% decrease in desflurane consumption and 23% reduction in sevoflurane consumption which represented a 51 542 kg EqCO<sub>2</sub> reduction in green-house gas emission.

*Conclusions:* The implementation of a management program for a well-reasoned use of volatile agents led to a significant reduction of greenhouse gas emission. This type of action should be undertaken to minimize the adverse effect of anesthesia on the environment.

## KEY POINTS SUMMARY

- Question: To determine whether the implementation of a management program for a well-reasoned use of volatile agents could decrease their consumption.
- Findings: We found a 35% decrease in mean FGF after implementing the management program ( $1.7 \pm 1.6$  L/min vs  $1.1 \pm 0.8$  L/min for Phase I and Phase II respectively,  $p < 0.001$ ). We found a 36% decrease in desflurane consumption and 23% reduction in sevoflurane consumption which represented a 51 542 kg EqCO<sub>2</sub> reduction in green-house gas emission.
- Meanings: We can reduce environmental impact caused by anesthesia.

## INTRODUCTION

Maintenance of general anesthesia is most of the time performed with halogenated agents (1). These gas are greenhouse gas, responsible for a notorious ecological impact (2–5,19,40). They are the main agents of healthcare system responsible for induced pollution (8,11). In the USA, healthcare system greenhouse gas production is responsible for 8% of the total ecological footprint. Operating room generate 20-30% of total hospital waste (21).

International treaties try to regulate greenhouse gas emissions (6,7). The reduction of greenhouse gas emissions was also enshrined in the french law in 2009 (Grenelle I & Grenelle II) (12). The act states that hospitals must reduce their greenhouse gas emissions by 2020.

Many studies have already given solutions to decrease anesthesia induced pollution : reduce fresh gas flow (9), use target controlled inhalation mode (10) and make the right halogenated agent choice, as they do not all have the same ecological impact (2,4,8,16). 100-year global warming potential ( $GWP_{100}$ ) is a measure of how much a given mass of greenhouse gas contributes to global warming over a specified time period.  $GWP_{100}$  of  $CO_2$  is one. Datas published in Anesthesia & Analgesia by Sulbaek (2) and Sherman (5) have shown that sevoflurane and desflurane  $GWP_{100}$  are very different.  $GWP_{100}$  of sevoflurane is 130 whereas  $GWP_{100}$  of desflurane is 2540. This gap between the two  $GWP_{100}$  of the most frequently used halogenated agents help us understand why hospitals using desflurane are by far more polluting than those favoring sevoflurane for anesthesia induction and maintenance (8). The American Society of Anesthesiology and the French Society of Anesthesiology and Intensive Care have recently published documents to improve environmental sustainability for anesthesia practice (21,41).

We therefore designed a management program based on a multimodal strategy to reduce our environmental impact. We performed an audit of clinical practice before and after implementation of this program. We hypothesized that the management program implementation would lead to a decrease in greenhouse gas emission at Bordeaux's teaching hospital. The primary endpoint was the reduction of mean FGF used for maintenance of general anesthesia.

## **METHODS**

The study was performed between February 1, 2017 and April 1, 2018 in a university hospital in Bordeaux, France. The hospital Ethics Committee of CHU of Bordeaux, France (Comité de Protection des Personnes) classified this project as an audit and waived the need for an informed consent because randomization was not used and the algorithm was part of routine practice. The study was approved by the local committee for audit of clinical practice (Cellule d'Aide Methodologique à l'Evaluation des Pratiques Professionnelles et à la Pertinence des soins, CAMEPPS) and was registered as audit of clinical practice n° 455.

### **Study population**

Consecutive patients (0 to 100 years old) scheduled for elective and emergency surgery (gynecology and obstetrics, neurosurgery, urology, vascular surgery, orthopedic surgery, pediatric surgery, plastic, ophthalmologic, maxillofacial, burn, ear, nose or throat surgery, emergency surgery, abdominal surgery and thoracic surgery) with general anesthesia requiring mechanical ventilation were prospectively included in this study. Patients could benefit from mechanical ventilation either by endotracheal intubation or laryngeal mask. Patients were not included if they were scheduled for procedure under local or loco-regional anesthesia. Patients scheduled for cardiac surgery were not included. Mechanical ventilation under general anesthesia consisted in a lung-protective strategy associating a tidal volume range of 6 to 8mL/kg, a PEEP range of 4 to 8 mmHg and recruiting maneuvers every 30 minutes.

### **The audit in three steps**

The management program was based on a three-stage protocol (**Figure 1**). All the anesthesia healthcare workers from Bordeaux's teaching hospital were involved in this audit (physicians, trainees, nurses).



Phase I (February to April 2017) corresponded to a simple prospective, observational study of professional practice management of volatile agents and mechanical ventilation during general anesthesia. We also performed a computer designed survey assessing healthcare workers knowledges about volatile agents ecological impact and ways of management. The management program was implemented before Phase II of the study and we presented the baseline data to the whole anesthesiology department of Bordeaux's teaching hospital 6 months after the end of Phase I (november 2017-january 2018). Datas were also presented in learning sessions and in congress presentations (42).

Phase II corresponded to the same prospective, observational assessment of professional practice management of halogenated agents and mechanical ventilation. Anesthesiologists were free to manage anesthesia as they wanted to and no recommendations were given.

Anesthesia was performed with nine different anesthetic machines: Felix<sup>®</sup> and Felix Ainoc<sup>®</sup> (Air Liquide, Paris, France), Zeus<sup>®</sup>, Primus<sup>®</sup>, Cato<sup>®</sup>, Perseus<sup>®</sup> and Julian<sup>®</sup> (Dräger, Lubeck, Germany), Flow-I<sup>®</sup> (Maquet, Rastatt, Germany) and Aisys<sup>®</sup> (General Electric, Boston, USA). Datas were collected on dedicated record forms.

### **Professional practice assessment**

The datas were recorded during Phase I and Phase II. They concerned: patients characteristics, type of surgery, medical histories, type of anesthesia station. Datas about induction were recorded: type of induction (intravenous or inhalatory), type of gas (air, oxygen or nitrous oxide), delivered and inspired fractions of gas, use of halogenated agent, FGF and use of target-controlled mode. The same datas were recorded for maintenance of general anesthesia.

### **Management program implementation**

The management program was implemented before Phase II of the study and we presented the baseline data to the whole anesthesiology department of Bordeaux's teaching hospital 6 months after the end of Phase I (november 2017 to january 2018).

We designed a global strategy that involved: 1) well-reasoned choice of halogenated agent, 2) the use of target-controlled mode if available, 3) the reduction of FGF if target controlled mode was not available. A protocol was designed and given to all the participants. The protocol was also available online.

Following the implementation of the management program we conducted Phase II, a prospective, observational study evaluating volatile agents and mechanical ventilation management during general anesthesia.

## **End points**

### Primary end point

Primary end point was the reduction of mean FGF (L/min) used for maintenance of general anesthesia. When maintenance was performed by using target-controlled inhalation mode, FGF was considered as 0.5L/min.

### Secondary end point

Secondary end points were : mean manually settled FGF used for maintenance, proportion of target controlled inhalation mode use for induction and maintenance of general anesthesia, proportion of nitrous oxide use for induction and maintenance of general anesthesia, mean inhaled fraction of oxygen during induction and maintenance of general anesthesia, logistic regression model to determine which variable was associated with a mean FGF for maintenance higher than 2L/min, volatile agents consumption, anesthesia cost during the study period and ecological impact of anesthesia, answers to the computer designed survey and knowledges about volatile agents ecological impact.

## Halogenated agents consumption and ecological cost

Halogenated agents consumption was recorded by the hospital's drug delivery department. Sevoflurane® (Abbvie, USA) and Desflurane® (Baxter, USA) consumption were recorded. Ecological footprint was calculated and expressed as « carbon dioxide equivalent » (eqkgCO<sub>2</sub>) (2,3,8,16,18). The calculation of « carbon dioxide equivalent » was performed thanks to each halogenated agent global warming potential (GWP<sub>100</sub>), tropospheric lifetime and consumption. The formula used was:

$$\text{EqkgCO}_2 = \text{volatile agent consumption (L)} \times \text{volumetric weight (kg/L)} \times \text{GWP}_{100}$$

## Computer designed survey

Anesthesiologists, trainees and nurses received an e-mail with the computer designed survey during Phase I of the study, between February 1,2017 and April 1, 2017. If no response was obtained, e-mails were sent again twice.

The survey was designed thanks to Survey Monkey® software. Participants were first asked about demographic datas (age, sex, occupation). They were then asked about their ways of management of inhaled anesthesia (halogenated agent choice and justification, use of nitrous oxide or not, setting of fresh gas flow if performed manually, use of target-controlled inhalation mode or not and justification of those choices). Finally, they were asked about their knowledges on anesthesia gas (global warming potential, greenhouse gas effect, ecological impact and economical cost).

## Statistical analyses

We used R software i386 3.5.0 to compare the Phase II results with the Phase I (control) results. Quantitative variables were expressed as means (SD) or medians (interquartile ranges, 25-75%) as appropriate. We examined whether quantitative variables followed a normal distribution (Shapiro-Wilk test) and performed the Student's t-test or the Mann-Whitney test as appropriate. Qualitative data were

expressed as numbers (percentage) and analyzed using a chi-squared test or Fisher's exact test, as appropriate. We used logistic regression to identify factors associated with a mean FGF greater than 2L/min. No calculation of sample size was performed since no similar study already exists. We considered that a sample size of 350 patients per Phase would provide 90% power to show a clinically relevant decrease in mean FGF using a Student t-test at an alpha level of 0.05 and beta level of 0.80.

## RESULTS

### Population

The study included 350 and 420 patients during Phase I and Phase II respectively, over a three-month period. The characteristics of patients and procedures are shown in **Table 1**. Study forms were filled by the same healthcare workers during both study periods.

### Primary outcome

Mean FGF (manually settled and TCI mode included) for maintenance of general anesthesia was significantly lower during Phase II than during Phase I ( $1.1 \pm 0.8$  L/min vs  $1.7 \pm 1.6$  L/min respectively,  $p < 0.001$ ). There was a 35% decrease in mean FGF during the two phases. Results are shown in **Figure 2**.

### Secondary outcomes

#### *Target-controlled inhalation use*

Anesthetic machine with target-controlled inhalation mode were more frequently available during Phase II than during Phase I (212/407 (52%) vs 136/343 (40%) respectively,  $p 0.0006$ ).

When target controlled inhalation mode was available, it was more frequently used for induction during Phase II than during Phase I (24% of procedures (51/212) vs 9% of procedures (12/136) respectively,  $p 0.0003$ ). There was no significant difference between Phase I and Phase II in target-controlled inhalation mode use for maintenance of general anesthesia (49% of procedures (66/136) vs 58% of procedures (122/212) respectively,  $p 0.09$ ). Results are shown in **Figure 3**.

#### *Manual setting of FGF, oxygen fraction and nitrous oxide use*

Manually settled mean FGF for maintenance of general anesthesia was significantly lower during Phase II than during Phase I ( $1.4 \pm 0.8$  L/min vs  $2.3 \pm 1.7$  L/min

respectively,  $p < 0.001$ ). There was a 40% decrease in mean manually settled FGF during the two phases.

During maintenance of general anesthesia, mean inspired oxygen fraction was significantly lower during phase II than during phase I (39% [34-46] vs 50% [40-55]) respectively,  $p < 0.001$ ) leading to a 22% reduction of mean inspired oxygen fraction.

There was no difference between mean inspired oxygen fraction during induction of general anesthesia between Phase I and Phase II (100% [100-100] vs 100% [100-100] respectively).

Nitrous oxide was not used during Phase I. During Phase II, only 4 inductions over 450 (0.008%) were performed by using nitrous oxide with sevoflurane. Nitrous oxide was not used for maintenance of general anesthesia during both phases.

#### *Volatile agents consumption and anesthesia ecological impact*

Volatile agents consumption was recorded by Bordeaux's teaching hospital central pharmacy department. Between Phase I and Phase II, there was a 36% decrease in desflurane consumption and a 23% decrease in sevoflurane consumption. This reduction led to a 51 542 kgEqCO<sub>2</sub> decrease in ecological cost concerning general anesthesia. Consumptions and ecological costs are shown in **Table 2**.

#### *Logistic regression model*

Four variables were included in the logistic regression model: age, ASA status, total anesthesia length and the maintenance of general anesthesia with intravenous drugs only. 298 procedures were included in the model.

The results of multivariable logistic regression are presented in **Table 3**.

After a multivariable adjustment, only totally intravenous administration for general anesthesia remained associated with a mean FGF greater than 2L/min ( $p < 0.003$ ).

#### *Audit of knowledges*

68 healthcare workers answered the computer-designed survey.

98.5% of responders declared using sevoflurane for maintenance of general anesthesia. The main reasons were local standard of care for 60% of responders, an

easy management for 57% of responders and personal habits for 53% of them. Economic reasons were declared by 16%. Less than 5% considered ecological reasons.

When evaluating mean FGF for maintenance of general anesthesia, less than 10% of responders declared setting FGF above 2L/min and 50% of them declared using TCI mode. Among the 68 responders, 19 declared using nitrous oxide (28% of responders). Most of them (16/19) declared using nitrous oxide for vena cannulation in children. 3/19 responders declared using nitrous oxide for induction and maintenance of general anesthesia.

An economic reason was considered by 44% of responders (30/68) to set FGF for maintenance. 3 responders only (4%) considered an ecologic issue to set FGF.

Responders also had to answer to economic questions about volatile agents costs. The expected right answer was that the price had remained stagnant and that desflurane was as expensive as sevoflurane (80€/bottle approximatively). However, 30% of responders considered that it had increased over the last years, 30% that it had decreased and 40% that it had remained stagnant. Most of the participants considered desflurane to be more expensive than sevoflurane.

They finally had to answer to ecological questions about volatile agents. 11 responders over 68 (16%) gave the right ranking for halogenated agent's global warming potential (from the highest to the lowest: desflurane > nitrous oxide > isoflurane > sevoflurane). 87% of participants (59/68) considered halogenated agents as greenhouse gas. In the 59-people subgroup of participants aware of greenhouse effect, the global warming potential was considered very low by 11% of responders, low by 45%, important by 40% and very important by 3%.

## DISCUSSION

Our study describes the design and implementation of a management program concerning volatile agents in the operating room in response to a combination of national guidelines (12,21,41) and international opinion (5,8,43). The resulting approach to optimize halogenated agents management was associated with a decrease of 35% of mean FGF (and 40% of mean manually settled FGF). It also led to an increase in target-controlled inhalation mode used for induction, a decrease of 22% in mean inspired oxygen fraction for maintenance of general anesthesia, a reduction of 36% in desflurane consumption over the study period and a reduction of 23% of sevoflurane consumption. These reductions led to a significant reduction of greenhouse gas emissions.

Totally intravenous maintenance of general anesthesia was associated with a FGF greater than 2L/min as revealed by the multivariate logistic regression model. Even if such a setting does not lead to an overconsumption of halogenated agent, it leads to an overconsumption of oxygen. Physicians and nurses seem to give less attention to ventilatory settings when totally intravenous anesthesia is delivered to the patient. Other variables were not associated with a FGF greater than 2L/min.

Taking ecological impact into account became compulsory for healthcare providers in France since the publication of Grenelle protocol in 2009 (12). Hospitals must reduce their energy consumption by 40% until 2020, put their waste to effective use and reduce their ecological impact. Anesthesiologists can reduce the ecological impact of general anesthesia if they use volatile anesthetics properly. Both nitrous oxide and halogenated agents have a greenhouse effect. Implementing a management program of halogenated agents in our hospital showed that such a procedure was feasible, efficient and secure. Patients benefit from the same level of care during Phase I and Phase II. We designed an original work, without any funding from the pharmaceutical industry. To our knowledge, it was the first audit of practice on halogenated agents management.

We reduced greenhouse gas emissions by 51 542 kgEqCO<sub>2</sub> over a 3-month period only. This reduction was calculated from our consumption database. The calculation protocol was based on different validated works (2,3,5,5,18,19). The same protocol



was used by MacNeil & al. in their recent Lancet-published study (8). They showed that the operating room is three to six times more energy-consuming than the hospital itself and are an appreciable source of greenhouse gas emission. MacNeil & al have also showed that anesthetics gas are the largest source of greenhouse gas emissions. They emphasize the harmful effect of desflurane (GWP<sub>100</sub> 2540) which is by far more polluting than sevoflurane (GWP<sub>100</sub> 130). According to the authors, removing desflurane from the operating theater could drastically reduce greenhouse gas emissions (8). In our study, desflurane consumption is ten-times lower than sevoflurane consumption but desflurane-induced ecological impact is twice higher than sevoflurane-induced impact. Moreover, desflurane is more polluting than sevoflurane for manufacturing, packaging, transport and drug delivery (5). It seems that ecological impact has been considered by healthcare providers during the study period as we observe a more significant reduction of desflurane consumption (-36%) than sevoflurane (-23%).

Very low use of nitrous oxide was reported in our study. Nitrous oxide is not only a greenhouse gas, it also destroys the ozone layer and has a long-term toxicity over patients and healthcare providers. Anesthesia practice has evolved and nitrous oxide use became very rare. Most of the new operating rooms are now « N<sub>2</sub>O free » (39,40,44).

Anesthesia induced ecological impact can also be reduced by changing the ways of administration of volatile agents. By reducing FGF and using TCI mode, we can decrease halogenated agents consumption and then reduce our ecological impact. Indeed, these gas have a very low metabolism (5% for sevoflurane & 0.5% for desflurane) and are discharged by anesthesia machines directly out of the buildings. To our knowledge, only one study took for primary end point the amount of greenhouse gas emission according to the delivery system. Tay & al (10) reported a 27% reduction of greenhouse gas emission after introducing target controlled inhalation mode in their standard of care. When Lortat-Jacob & al compared manual setting vs TCI mode on Aisys® (GE), they reported a 65% reduction of desflurane consumption (9). In 1981 already, Lowe & Ernst were calling for a reasoned setting of FGF and oxygen delivery, based on the patient's metabolic demand during general anesthesia (30). They already thought that close-loop anesthesia was feasible. Target controlled inhalation mode allowed a significant reduction of FGF for maintenance of anesthesia. Target controlled

inhalation mode is not only quick, ergonomic and economic, it is also ecologically relevant.

Our study has several limitations. Firstly, we could not calculate the necessary sample size because no other similar study was found. However, with 350 patients included during Phase I and 420 in Phase II we found a statistically significant result. Secondly, results concerning the oxygen fraction for maintenance of general anesthesia may be biased by a better setting of mechanical ventilation during Phase II (better PEEP and recruiting maneuvers management). Finally, data about target-controlled inhalation mode availability were not recorded during Phase I. We had to calculate them *a posteriori* leading to a risk of over-estimation. However, target controlled inhalation mode (when it was available on anesthesia station) remained under used even during Phase II and after implementation of the management program (24% of induction and 57% of maintenance). This under-use of TCI emphasizes the need for ongoing theoretical and practical teaching in the field of eco responsibility.

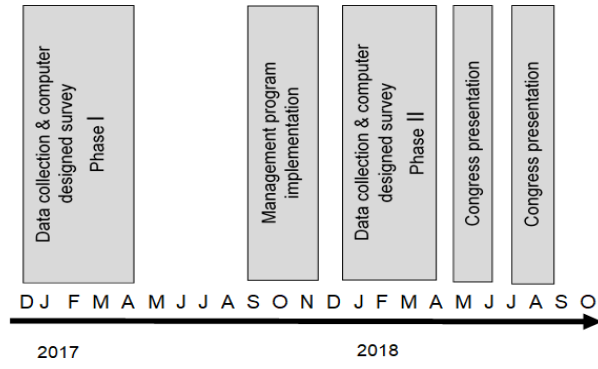
## REFERENCES

1. Benhamou D, Constant I, Longrois D, Molliex S, Nouette-Gaulain K, Bull A. Use of volatile anaesthetic agents in anaesthesia: A survey of practice in France in 2012. *Anaesth Crit Care Pain Med*. 2015 Aug 1;34(4):205–9.
2. Andersen MPS, Nielsen OJ, Wallington TJ, Karpichev B, Sander SP. Assessing the Impact on Global Climate from General Anesthetic Gases. *Anesth Analg*. 2012 May 1;114(5):1081–5.
3. Andersen MPS, Sander SP, Nielsen OJ, Wagner DS, Sanford TJ, Wallington TJ. Inhalation anaesthetics and climate change†. *Br J Anaesth*. 2010 Dec 1;105(6):760–6.
4. Sherman J, McGain F. Environmental Sustainability in Anesthesia: Pollution Prevention and Patient Safety. *Adv Anesth*. 2016 Jan 1;34(1):47–61.
5. Sherman J, Le C, Lamers V, Eckelman M. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Anesthetic Drugs. *Anesth Analg*. 2012 May;114(5):1086.
6. Unies N. Protocole de Kyoto la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Kyoto Jpn Ligne Httpunfccc Intresourcedocsconvkpkpfrench Pdf Page Consult 15 Avril 2010. 1998;
7. Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer - UN Documents: Gathering a body of global agreements [Internet]. [cited 2018 Jun 21]. Available from: <http://www.un-documents.net/mpsdol.htm>
8. MacNeill AJ, Lillywhite R, Brown CJ. The impact of surgery on global climate: a carbon footprinting study of operating theatres in three health systems. *Lancet Planet Health*. 2017 Dec 1;1(9):e381–8.
9. Lortat-Jacob B, Billard V, Buschke W, Servin F. Assessing the clinical or pharmaco-economical benefit of target controlled desflurane delivery in surgical patients using the Zeus® anaesthesia machine\*. *Anaesthesia*. 2009 Nov 1;64(11):1229–35.
10. Tay S, Weinberg L, Peyton P, Story D, Briedis J. Financial and environmental costs of manual versus automated control of end-tidal gas concentrations. *Anaesth Intensive Care*. 2013 Jan;41(1):95–101.
11. Taylor T, Mackie P. Carbon footprinting in health systems: one small step towards planetary health. *Lancet Planet Health*. 2017 Dec 1;1(9):e357–8.
12. Grenelle II.pdf.
13. Myles PS, Leslie K, Chan MTV, Forbes A, Peyton PJ, Paech MJ, et al. The safety of addition of nitrous oxide to general anaesthesia in at-risk patients having major non-cardiac surgery (ENIGMA-II): a randomised, single-blind trial. *The Lancet*. 2014 Oct 18;384(9952):1446–54.

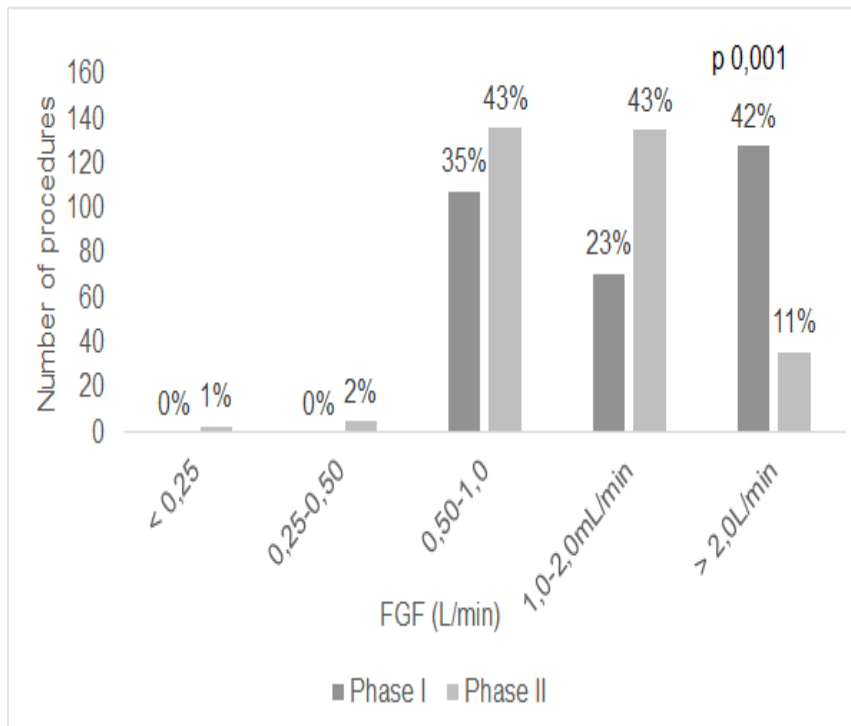
14. Herzberg G, Crawford BL. Infrared and Raman Spectra of Polyatomic Molecules. *J Phys Chem.* 1946 Mar 1;50(3):288–288.
15. Radiative forcing of climate by hydrochlorofluorocarbons and hydrofluorocarbons. *J Geophys Res Atmospheres.* 2012 Sep 21;117(D11):23227–38.
16. Ishizawa Y. General Anesthetic Gases and the Global Environment. *Anesth Analg.* 2011 Jan 1;112(1):213–7.
17. Brown AC, Canosa-Mas CE, Parr AD, Pierce JMT, Wayne RP. Tropospheric lifetimes of halogenated anaesthetics. *Nature.* 1989 Oct 19;341(6243):635–7.
18. Langbein T, Sonntag H, Trapp D, Hoffmann A, Malms W, Röth EP, et al. Volatile anaesthetics and the atmosphere: atmospheric lifetimes and atmospheric effects of halothane, enflurane, isoflurane, desflurane and sevoflurane. *BJA Br J Anaesth.* 1999 Jan 1;82(1):66–73.
19. Vollmer MK, Rhee TS, Rigby M, Hofstetter D, Hill M, Schoenenberger F, et al. Modern inhalation anesthetics: Potent greenhouse gases in the global atmosphere. *Geophys Res Lett.* 2015 Mar 16;42(5):2014GL062785.
20. Montzka SA, Dutton GS, Yu P, Ray E, Portmann RW, Daniel JS, et al. An unexpected and persistent increase in global emissions of ozone-depleting CFC-11. *Nature.* 2018 May;557(7705):413–7.
21. Greening the OR 2 - American Society of Anesthesiologists (ASA) [Internet]. [cited 2018 Jun 23]. Available from: <https://www.asahq.org/resources/resources-from-asa-committees/environmental-sustainability/greening-the-operating-room#3gas>
22. rapport\_brundtland.pdf [Internet]. [cited 2019 Jan 7]. Available from: [https://www.diplomatie.gouv.fr/sites/odyssee-developpement-durable/files/5/rapport\\_brundtland.pdf](https://www.diplomatie.gouv.fr/sites/odyssee-developpement-durable/files/5/rapport_brundtland.pdf)
23. Ecological Responsibility in Anesthesia Practice : International Anesthesiology Clinics [Internet]. LWW. [cited 2017 Jun 8]. Available from: [http://journals.lww.com/anesthesiaclinics/Fulltext/2010/04830/Ecological\\_Responsibility\\_in\\_Anesthesia\\_Practice.11.aspx](http://journals.lww.com/anesthesiaclinics/Fulltext/2010/04830/Ecological_Responsibility_in_Anesthesia_Practice.11.aspx)
24. Model-based automatic feedback control versus human control of end-tidal isoflurane concentration using low-flow anaesthesia - British Journal of Anaesthesia [Internet]. [cited 2018 Dec 16]. Available from: [https://bjanaesthesia.org/article/S0007-0912\(17\)36781-8/fulltext](https://bjanaesthesia.org/article/S0007-0912(17)36781-8/fulltext)
25. Singaravelu S, Barclay P. Automated control of end-tidal inhalation anaesthetic concentration using the GE Aisys Carestation™†. *Br J Anaesth.* 2013 Apr 1;110(4):561–6.

26. Kharasch ED, Hankins DC, Thummel KE. Human Kidney Methoxyflurane and Sevoflurane Metabolism Intrarenal Fluoride Production as a Possible Mechanism of Methoxyflurane Nephrotoxicity. *Anesthesiol J Am Soc Anesthesiol*. 1995 Mar 1;82(3):689–99.
27. Kharasch ED, Jubert C. Compound A Uptake and Metabolism to Mercapturic Acids and 3,3,3-Trifluoro-2-fluoromethoxypropanoic Acid during Low-flow Sevoflurane Anesthesia Biomarkers for Exposure, Risk Assessment, and Interspecies Comparison. *Anesthesiol J Am Soc Anesthesiol*. 1999 Nov 1;91(5):1267–1267.
28. Eger EI, Koblin DD, Bowland T, Ionescu P, Laster MJ, Fang Z, et al. Nephrotoxicity of Sevoflurane Versus Desflurane Anesthesia in Volunteers. *Anesth Analg*. 1997 Jan 1;84(1):160–8.
29. Ong Sio LCL, dela Cruz RGC, Bautista AF. Sevoflurane and renal function: a meta-analysis of randomized trials. *Med Gas Res*. 2017 Oct 17;7(3):186–93.
30. Lowe HJ, Ernst EA. *The Quantitative Practice of Anesthesia: Use of Closed Circuit*. Williams & Wilkins; 1981. 260 p.
31. Martin DS, Grocott MPW. Oxygen therapy and anaesthesia: too much of a good thing? *Anaesthesia*. 2015;70(5):522–7.
32. Jakutis G, Norkienė I, Ringaitienė D, Jovaiša T. Severity of hyperoxia as a risk factor in patients undergoing on-pump cardiac surgery. *Acta Medica Litua*. 2017;24(3):153.
33. Cardiovascular effects of hyperoxia during and after cardiac surgery - Spoelstra-de Man - 2015 - *Anaesthesia* - Wiley Online Library [Internet]. [cited 2019 Jan 10]. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/anae.13218>
34. Pryor KO, Iii TJF, Lien CA, Goldstein PA. Surgical Site Infection and the Routine Use of Perioperative Hyperoxia in a General Surgical Population: A Randomized Controlled Trial. *JAMA*. 2004 Jan 7;291(1):79–87.
35. Helmerhorst HJF, de Wilde RBP, Lee DH, Palmén M, Jansen JRC, van Westerloo DJ, et al. Hemodynamic effects of short-term hyperoxia after coronary artery bypass grafting. *Ann Intensive Care* [Internet]. 2017 Feb 23;7. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5323416/>
36. Intraoperative oxygen concentration and neurocognition after cardiac surgery: study protocol for a randomized controlled trial | *Trials* | Full Text [Internet]. [cited 2019 Jan 10]. Available from: <https://trialsjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13063-017-2337-1>
37. Leslie K, Myles PS, Chan MTV, Forbes A, Paech MJ, Peyton P, et al. Nitrous Oxide and Long-term Morbidity and Mortality in the Enigma Trial. *Anesth Analg*. 2011 Feb 1;112(2):387–93.

38. Faut-il\_supprimer\_le\_protoxyde\_d\_azote\_au\_bloc\_operatoire\_\_.pdf [Internet]. [cited 2017 Dec 4]. Available from: [https://sofia.medicalistes.fr/spip/IMG/pdf/Faut-il\\_supprimer\\_le\\_protoxyde\\_d\\_azote\\_au\\_bloc\\_operatoire\\_\\_.pdf](https://sofia.medicalistes.fr/spip/IMG/pdf/Faut-il_supprimer_le_protoxyde_d_azote_au_bloc_operatoire__.pdf)
39. Gilani S, Sofi K. Is nitrous oxide necessary for general anaesthesia? J Ayub Med Coll Abbottabad JAMC. 2008 Oct 1;20:149–52.
40. Sherman SJ, Cullen BF. Nitrous Oxide and the Greenhouse Effect. Anesthesiol J Am Soc Anesthesiol. 1988 May 1;68(5):816–816.
41. Muret J, Matezak M-P, Houille M. Le bloc opératoire durable. Prat En Anesth Réanimation. 2017 Apr 1;21(2):98–101.
42. Gress G, Pauchard J-C, Nouette-Gaulain K. How to reduce anesthesia induced ecological impact? An example from Bordeaux University Hospital.
43. Feldman J. Managing Fresh Gas Flow to Reduce Environmental Contaminatio... : Anesthesia & Analgesia [Internet]. LWW. [cited 2017 Jun 8]. Available from: [http://journals.lww.com/anesthesia-analgesia/Fulltext/2012/05000/Managing\\_Fresh\\_Gas\\_Flow\\_to\\_Reduce\\_Environmental.27.aspx](http://journals.lww.com/anesthesia-analgesia/Fulltext/2012/05000/Managing_Fresh_Gas_Flow_to_Reduce_Environmental.27.aspx)
44. Myles PS, Leslie K, Chan MTV, Forbes A, Paech MJ, Peyton P, et al. Avoidance of Nitrous Oxide for Patients Undergoing Major SurgeryA Randomized Controlled Trial. Anesthesiol J Am Soc Anesthesiol. 2007 Aug 1;107(2):221–31.

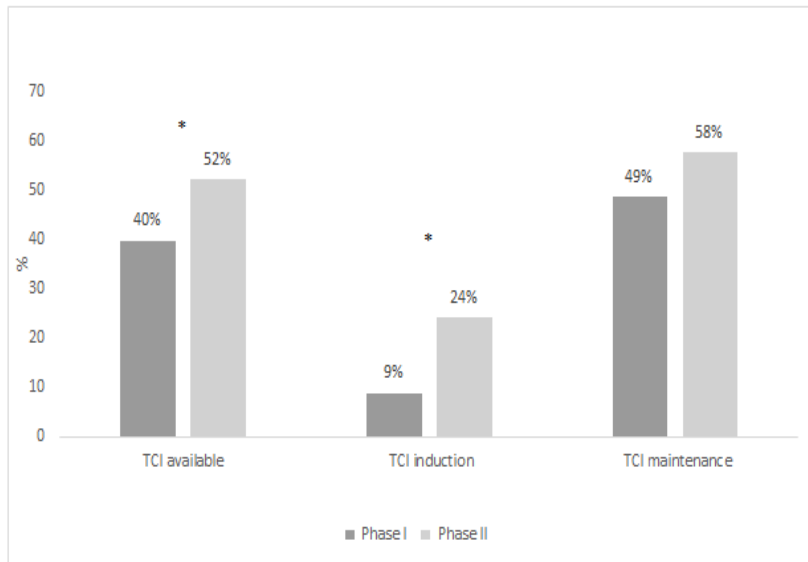


**Figure 1.** Study timeline



**Figure 2.** Mean FGF during maintenance of general anesthesia according to the study phase,  $p < 0.001$





**Figure 3.** Availability and use of TCI mode according to the study phase, \*  $p < 0.05$

Variable	Phase 1 Feb-April 2017 n=350	Phase 2 Feb-April 2018 n=420	p
<b>Sex</b>			
Male	176 (50%)	244 (58%)	0,034
Female	174 (50%)	176 (42%)	0,034
<b>Weight (kg)</b>	64 [50 ; 77,5]	64 [50,5 ; 77,5]	NS
<b>Height (cm)</b>	166 [160 ; 174]	167 [158 ; 174]	NS
<b>BMI (kg/m<sup>2</sup>)</b>	23,59 [20,07 ; 27,13]	23,46 [20,32 ; 26,94]	NS
<b>Age (years)</b>	47 [24 ; 62]	45 [15 ; 64,75]	NS
<b>ASA</b>			
I	120 (34%)	157 (37%)	NS
II	158 (45%)	226 (53%)	NS
III	70 (20%)	64 (15%)	NS
IV	1 (0%)	1 (0%)	NS
<b>Emergency</b>			
Yes	28 (8%)	72 (17%)	< 0,01
No	322 (92%)	348 (83%)	< 0,01
<b>SAS</b>			
Yes	17 (5%)	20 (5%)	NS
No	333 (95%)	400 (95%)	NS
<b>Asthma</b>			
Yes	20 (6%)	24 (6%)	NS
No	330 (94%)	396 (94%)	NS
<b>COPD</b>			
Yes	12 (3%)	24 (6%)	NS
No	338 (97%)	396 (94%)	NS
<b>Mean anesthesia duration</b>	118 ± 78	137 ± 87	0,01

**Table 1.** Demographic data during Phase I and Phase II

<b>Variable</b>	<b>Phase I Feb-April 2017</b>	<b>Phase II Feb-April 2018</b>
Interventions	11 414	11 192
<b>DESFLURANE</b>		
Bottles	113	72
Volume (L)	28	18
Cost (€)	2 209	1 408
EqCO2 (kg)	104 515	66 620
Km	746 536	475 858
<b>SEVOFLURANE</b>		
Bottles	1 208	932
Volume (L)	302	233
Cost (€)	25 061	19 329
EqCO2 (kg)	59 663	46 016
Km	426 164	328 688

**Table 2. Consumption & related ecological cost of halogenated agents during Phase I & Phase II**

	n	OR	2,50%	97,50%	p-value
Age	298	1,0024	0,9804	1,0258	0,8359
ASA	298	0,9374	0,4409	1,8995	0,8612
Total anesthesia length	298	1,0003	0,994	1,0058	0,909
IV maintenance	298				0,003
Yes		1			
No		0,2126	0,0712	0,5694	

**Table 3.** Multivariate logistic regression model. \* OR < 1 was associated with a mean FGF <2L/min

## DISCUSSION

Notre étude retrouve une réduction de 35% du DGF moyen utilisé pour l'entretien de l'anesthésie générale après mise en place du protocole d'utilisation raisonnée des AH au CHU de Bordeaux. Ces données encourageantes concernant le critère de jugement principal sont également retrouvées sur les critères de jugement secondaires. On retrouve notamment une utilisation plus importante du mode AINOC pour l'induction, une diminution de 22% de la FiO<sub>2</sub> moyenne utilisée pour l'entretien et une réduction de consommation d'AH de 36% pour le sevoflurane et de 23% pour le desflurane, réalisant ainsi, pour la période analysée, une économie d'émission de gaz à effet de serre (GES) représentant 51 542 KgEqCO<sub>2</sub> et générant des économies budgétaires de 6 533 euros.

L'analyse de régression logistique multivariée définie *a priori* retrouve que seul l'entretien de l'anesthésie générale par voie intraveineuse pure était associé à un réglage du DGF > 2L/min. Ce résultat peut être expliqué par une moindre « éco-sensibilité » au réglage de ce paramètre ventilatoire par les praticiens dans le contexte de l'anesthésie totale intraveineuse. Les autres variables étudiées n'étaient pas associées à un réglage du DGF > 2L/min.

La prise en compte de notre impact écologique est une obligation légale pour les établissements de santé, (responsables de 8% des émissions totales de GES aux USA) soumis à la Responsabilité Sociétale d'Entreprise (RSE) (21) dans le cadre des protocoles de Grenelle en 2009 (12). En France, les établissements sont ainsi dans l'obligation de réduire d'ici à 2020 leur consommation énergétique de 40% et de valoriser leurs déchets. Deux types de gaz utilisés en anesthésie sont classés comme GES : le protoxyde d'azote et les agents halogénés (desflurane et sevoflurane). Maîtriser et diminuer leur consommation est donc une obligation légale en plus d'être une nécessité écologique.

Notre étude possède certaines forces. Il s'agit d'un travail original, sans équivalent à notre connaissance existant dans la littérature médicale actuelle. De plus, ce travail n'a pas reçu de financement ni de soutien de la part de l'industrie pharmaceutique. Les inclusions ont été réalisées de façon consécutive et exhaustive à l'échelle du CHU de Bordeaux, ce qui garantit la représentativité de la population

étudiée. Enfin, ce travail démontre la faisabilité de l'implémentation d'un protocole simple d'utilisation raisonnée des AH pour réduire l'impact écologique de l'anesthésie inhalée sans diminution de la qualité de prise en charge anesthésique.

Les calculs d'émissions de gaz et de coût carbone ont été réalisés à partir de travaux fondamentaux validés par la communauté scientifique (2,3,5,18,19) et repris dans l'étude de McNeil et al publiée dans *Lancet* en 2017 (8). Selon cette étude, les activités d'anesthésie et de chirurgie sont les principales pourvoyeuses d'émission de gaz à effet de serre au sein des structures hospitalières, à hauteur de 20 à 30% des émissions totales environ. Les auteurs mettent notamment en avant le rôle principal joué par les AH dans la pollution environnementale et soulignent l'impact néfaste de l'utilisation du plus pollueur d'entre eux et à lui seul responsable de 90% du coût carbone de l'anesthésie inhalée : le desflurane. Les auteurs avancent que l'éviction du desflurane permettrait de diminuer considérablement l'empreinte écologique de l'anesthésie par inhalation sans compromettre la qualité des soins (8). Le coût carbone associé à la production, l'acheminement, le conditionnement, le transport et l'administration des agents halogénés a été évalué par Sherman et al (5). Là encore le coût carbone du cycle de vie complet du desflurane est deux fois supérieur à celui du sevoflurane.

L'utilisation prépondérante du mode AINOC pour l'entretien de l'AG a permis une réduction des DGF pour l'entretien de l'anesthésie et de consommation d'agents halogénés. Ces résultats sont également retrouvés par Tay et al (10) qui ont objectivé une diminution de 44% des émissions de gaz à effet de serre après remplacement de leur parc de respirateur pour des respirateurs équipés du mode AINOC. Lors d'une étude comparant un réglage manuel à un réglage automatisé des AH, Lortat-Jacob et al rapportent une diminution de la consommation de desflurane de 65% en utilisant le mode AINOC de l'Aisys<sup>®</sup> (General Electric<sup>®</sup>) (9). En 1981 déjà, Lowe et Ernst plaidaient pour un réglage approprié des DGF et des fractions inspirées en oxygène et AH (30) et envisageaient la perspective d'une anesthésie en circuit fermé, rendue possible par un calcul préalable des besoins métaboliques des patients sous anesthésie générale. Cette réduction a longtemps fait craindre le risque de mélange hypoxique. Nous savons cependant que les besoins métaboliques en oxygène sous anesthésie générale sont compris entre 250 et 500mL/min. Une approche simplifiée est donnée par la formule de Brody :  $VO_2 \text{ (mL/min)} = 3,5 \times \text{poids (kg)}$ . Il est donc licite

et sécuritaire d'utiliser des DGF avoisinant 500mL/min. Ces notions fondamentales sont reprises dans les guides de développement durable de la SFAR et de l'ASA, tous deux édités en 2017 (21).

Nos résultats sont cependant limités par certaines faiblesses. Nous n'avons pas pu calculer le nombre de sujets nécessaire a priori. Cette limite est expliquée par l'absence d'étude semblable dans la littérature, ne permettant ainsi pas la réalisation d'un tel calcul. Dans ce contexte et en accord avec l'équipe de méthodologie statistique du CHU de Bordeaux, il a été décidé d'inclure 350 patients par phase au minimum. Notre étude a cependant permis de mettre en évidence une réduction cliniquement et statistiquement significative de 35% du DGF moyen utilisé pour l'entretien de l'anesthésie. L'étude est également limitée par l'absence de recueil de la variable « AINOC possible » sur les respirateurs utilisés pendant la phase 1. Cette donnée a été calculée *a posteriori* à partir de la fréquence de disponibilité du mode AINOC sur les respirateurs d'anesthésie disponibles au CHU de Bordeaux. La différence statistiquement significative de disponibilité du mode AINOC retrouvée entre les deux phases (52% vs 40%, p 0,0006) peut être expliquée par cette approximation ainsi que par le remplacement de certains respirateurs d'anesthésie entre les deux périodes d'inclusion. La sous-utilisation du mode AINOC reste cependant fréquente ; pendant la phase 2, soit après les sessions de formation et l'implémentation du protocole d'usage raisonné, seuls 24% des inductions et 57% des entretiens étaient réalisés en AINOC (lorsque celui-ci était disponible). De plus, on ne retrouve pas de différence statistiquement significative dans l'utilisation du mode AINOC pour l'entretien de l'anesthésie (59% vs 48%, p 0,09). Cette sous-utilisation souligne la nécessité de poursuivre la formation théorique et pratique en la matière. Le résultat concernant la réduction de  $F_{iO_2}$  moyenne réglée pour l'entretien de l'anesthésie, bien qu'encourageant, dissimule peut-être un biais, notre étude ayant retrouvé des réglages plus optimisés de la ventilation mécanique au cours de la phase II avec notamment une PEP moyenne plus élevée ainsi qu'un recours plus fréquent aux manœuvres de recrutement alvéolaires per-opératoires. Une limite évidente enfin est celle du recueil des données en « ouvert » exposant à un risque de biais important.

La prise en compte de l'impact écologique de nos pratiques est aujourd'hui devenue indispensable. L'introduction de protocoles d'utilisation raisonnée des agents halogénés et des réglages des DGF au bloc opératoire est faisable et permet une

réduction notoire des émissions et des consommations en gaz d'anesthésie. La généralisation de tels protocoles paraît donc légitime.



## BIBLIOGRAPHIE

1. Benhamou D, Constant I, Longrois D, Molliex S, Nouette-Gaulain K, Bull A. Use of volatile anaesthetic agents in anaesthesia: A survey of practice in France in 2012. *Anaesth Crit Care Pain Med*. 2015 Aug 1;34(4):205–9.
2. Andersen MPS, Nielsen OJ, Wallington TJ, Karpichev B, Sander SP. Assessing the Impact on Global Climate from General Anesthetic Gases. *Anesth Analg*. 2012 May 1;114(5):1081–5.
3. Andersen MPS, Sander SP, Nielsen OJ, Wagner DS, Sanford TJ, Wallington TJ. Inhalation anaesthetics and climate change†. *Br J Anaesth*. 2010 Dec 1;105(6):760–6.
4. Sherman J, McGain F. Environmental Sustainability in Anesthesia: Pollution Prevention and Patient Safety. *Adv Anesth*. 2016 Jan 1;34(1):47–61.
5. Sherman J, Le C, Lamers V, Eckelman M. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Anesthetic Drugs. *Anesth Analg*. 2012 May;114(5):1086.
6. Unies N. Protocole de Kyoto la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Kyoto Jpn Ligne Httpunfccc Intresourcedocsconvkpkpfrench Pdf Page Consult 15 Avril 2010. 1998;
7. Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer - UN Documents: Gathering a body of global agreements [Internet]. [cited 2018 Jun 21]. Available from: <http://www.un-documents.net/mpsdol.htm>
8. MacNeill AJ, Lillywhite R, Brown CJ. The impact of surgery on global climate: a carbon footprinting study of operating theatres in three health systems. *Lancet Planet Health*. 2017 Dec 1;1(9):e381–8.
9. Lortat-Jacob B, Billard V, Buschke W, Servin F. Assessing the clinical or pharmacoeconomical benefit of target controlled desflurane delivery in surgical patients using the Zeus® anaesthesia machine\*. *Anaesthesia*. 2009 Nov 1;64(11):1229–35.
10. Tay S, Weinberg L, Peyton P, Story D, Briedis J. Financial and environmental costs of manual versus automated control of end-tidal gas concentrations. *Anaesth Intensive Care*. 2013 Jan;41(1):95–101.
11. Taylor T, Mackie P. Carbon footprinting in health systems: one small step towards planetary health. *Lancet Planet Health*. 2017 Dec 1;1(9):e357–8.
12. Grenelle II.pdf.
13. Myles PS, Leslie K, Chan MTV, Forbes A, Peyton PJ, Paech MJ, et al. The safety of addition of nitrous oxide to general anaesthesia in at-risk patients having major non-cardiac surgery (ENIGMA-II): a randomised, single-blind trial. *The Lancet*. 2014 Oct 18;384(9952):1446–54.
14. Herzberg G, Crawford BL. Infrared and Raman Spectra of Polyatomic Molecules. *J Phys Chem*. 1946 Mar 1;50(3):288–288.
15. Radiative forcing of climate by hydrochlorofluorocarbons and hydrofluorocarbons. *J Geophys Res Atmospheres*. 2012 Sep 21;100(D11):23227–38.

16. Ishizawa Y. General Anesthetic Gases and the Global Environment. *Anesth Analg*. 2011 Jan 1;112(1):213–7.
17. Brown AC, Canosa-Mas CE, Parr AD, Pierce JMT, Wayne RP. Tropospheric lifetimes of halogenated anaesthetics. *Nature*. 1989 Oct 19;341(6243):635–7.
18. Langbein T, Sonntag H, Trapp D, Hoffmann A, Malms W, Röth EP, et al. Volatile anaesthetics and the atmosphere: atmospheric lifetimes and atmospheric effects of halothane, enflurane, isoflurane, desflurane and sevoflurane. *BJA Br J Anaesth*. 1999 Jan 1;82(1):66–73.
19. Vollmer MK, Rhee TS, Rigby M, Hofstetter D, Hill M, Schoenenberger F, et al. Modern inhalation anesthetics: Potent greenhouse gases in the global atmosphere. *Geophys Res Lett*. 2015 Mar 16;42(5):2014GL062785.
20. Montzka SA, Dutton GS, Yu P, Ray E, Portmann RW, Daniel JS, et al. An unexpected and persistent increase in global emissions of ozone-depleting CFC-11. *Nature*. 2018 May;557(7705):413–7.
21. Greening the OR 2 - American Society of Anesthesiologists (ASA) [Internet]. [cited 2018 Jun 23]. Available from: <https://www.asahq.org/resources/resources-from-asa-committees/environmental-sustainability/greening-the-operating-room#3gas>
22. rapport\_brundtland.pdf [Internet]. [cited 2019 Jan 7]. Available from: [https://www.diplomatie.gouv.fr/sites/odyssee-developpement-durable/files/5/rapport\\_brundtland.pdf](https://www.diplomatie.gouv.fr/sites/odyssee-developpement-durable/files/5/rapport_brundtland.pdf)
23. Ecological Responsibility in Anesthesia Practice : International Anesthesiology Clinics [Internet]. LWW. [cited 2017 Jun 8]. Available from: [http://journals.lww.com/anesthesiaclinics/Fulltext/2010/04830/Ecological\\_Responsibility\\_in\\_Anesthesia\\_Practice.11.aspx](http://journals.lww.com/anesthesiaclinics/Fulltext/2010/04830/Ecological_Responsibility_in_Anesthesia_Practice.11.aspx)
24. Model-based automatic feedback control versus human control of end-tidal isoflurane concentration using low-flow anaesthesia - *British Journal of Anaesthesia* [Internet]. [cited 2018 Dec 16]. Available from: [https://bjanaesthesia.org/article/S0007-0912\(17\)36781-8/fulltext](https://bjanaesthesia.org/article/S0007-0912(17)36781-8/fulltext)
25. Singaravelu S, Barclay P. Automated control of end-tidal inhalation anaesthetic concentration using the GE Aisys Carestation™†. *Br J Anaesth*. 2013 Apr 1;110(4):561–6.
26. Kharasch ED, Hankins DC, Thummel KE. Human Kidney Methoxyflurane and Sevoflurane Metabolism Intrarenal Fluoride Production as a Possible Mechanism of Methoxyflurane Nephrotoxicity. *Anesthesiol J Am Soc Anesthesiol*. 1995 Mar 1;82(3):689–99.
27. Kharasch ED, Jubert C. Compound A Uptake and Metabolism to Mercapturic Acids and 3,3,3-Trifluoro-2-fluoromethoxypropanoic Acid during Low-flow Sevoflurane Anesthesia Biomarkers for Exposure, Risk Assessment, and Interspecies Comparison. *Anesthesiol J Am Soc Anesthesiol*. 1999 Nov 1;91(5):1267–1267.
28. Eger EI, Koblin DD, Bowland T, Ionescu P, Laster MJ, Fang Z, et al. Nephrotoxicity of Sevoflurane Versus Desflurane Anesthesia in Volunteers. *Anesth Analg*. 1997 Jan 1;84(1):160–8.

29. Ong Sio LCL, dela Cruz RGC, Bautista AF. Sevoflurane and renal function: a meta-analysis of randomized trials. *Med Gas Res.* 2017 Oct 17;7(3):186–93.
30. Lowe HJ, Ernst EA. *The Quantitative Practice of Anesthesia: Use of Closed Circuit.* Williams & Wilkins; 1981. 260 p.
31. Martin DS, Grocott MPW. Oxygen therapy and anaesthesia: too much of a good thing? *Anaesthesia.* 2015;70(5):522–7.
32. Jakutis G, Norkienė I, Ringaitienė D, Jovaiša T. Severity of hyperoxia as a risk factor in patients undergoing on-pump cardiac surgery. *Acta Medica Litu.* 2017;24(3):153.
33. Cardiovascular effects of hyperoxia during and after cardiac surgery - Spoelstra-de Man - 2015 - *Anaesthesia* - Wiley Online Library [Internet]. [cited 2019 Jan 10]. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/anae.13218>
34. Pryor KO, Iii TJF, Lien CA, Goldstein PA. Surgical Site Infection and the Routine Use of Perioperative Hyperoxia in a General Surgical Population: A Randomized Controlled Trial. *JAMA.* 2004 Jan 7;291(1):79–87.
35. Helmerhorst HJF, de Wilde RBP, Lee DH, Palmén M, Jansen JRC, van Westerloo DJ, et al. Hemodynamic effects of short-term hyperoxia after coronary artery bypass grafting. *Ann Intensive Care* [Internet]. 2017 Feb 23;7. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5323416/>
36. Intraoperative oxygen concentration and neurocognition after cardiac surgery: study protocol for a randomized controlled trial | *Trials* | Full Text [Internet]. [cited 2019 Jan 10]. Available from: <https://trialsjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13063-017-2337-1>
37. Leslie K, Myles PS, Chan MTV, Forbes A, Paech MJ, Peyton P, et al. Nitrous Oxide and Long-term Morbidity and Mortality in the Enigma Trial. *Anesth Analg.* 2011 Feb 1;112(2):387–93.
38. Faut-il supprimer le protoxyde d'azote au bloc opératoire \_\_.pdf [Internet]. [cited 2017 Dec 4]. Available from: [https://sofia.medicalistes.fr/spip/IMG/pdf/Faut-il\\_supprimer\\_le\\_protoxyde\\_d\\_azote\\_au\\_bloc\\_operatoire\\_\\_.pdf](https://sofia.medicalistes.fr/spip/IMG/pdf/Faut-il_supprimer_le_protoxyde_d_azote_au_bloc_operatoire__.pdf)
39. Gilani S, Sofi K. Is nitrous oxide necessary for general anaesthesia? *J Ayub Med Coll Abbottabad JAMC.* 2008 Oct 1;20:149–52.
40. Sherman SJ, Cullen BF. Nitrous Oxide and the Greenhouse Effect. *Anesthesiol J Am Soc Anesthesiol.* 1988 May 1;68(5):816–816.
41. Muret J, Matezak M-P, Houille M. Le bloc opératoire durable. *Prat En Anesth Réanimation.* 2017 Apr 1;21(2):98–101.
42. Gress G, Pauchard J-C, Nouette-Gaulain K. How to reduce anesthesia induced ecological impact? An example from Bordeaux University Hospital.
43. Feldman J. Managing Fresh Gas Flow to Reduce Environmental Contaminatio... : *Anesthesia & Analgesia* [Internet]. LWW. [cited 2017 Jun 8]. Available from: [http://journals.lww.com/anesthesia-analgesia/Fulltext/2012/05000/Managing\\_Fresh\\_Gas\\_Flow\\_to\\_Reduce\\_Environmental.27.aspx](http://journals.lww.com/anesthesia-analgesia/Fulltext/2012/05000/Managing_Fresh_Gas_Flow_to_Reduce_Environmental.27.aspx)

44. Myles PS, Leslie K, Chan MTV, Forbes A, Paech MJ, Peyton P, et al. Avoidance of Nitrous Oxide for Patients Undergoing Major Surgery A Randomized Controlled Trial. *Anesthesiol J Am Soc Anesthesiol*. 2007 Aug 1;107(2):221–31.

## Serment d'Hippocrate

Au moment d'être admis à exercer la médecine, je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité.

Mon premier souci sera de rétablir, de préserver ou de promouvoir la santé dans tous ses éléments, physiques et mentaux, individuels et sociaux.

Je respecterai toutes les personnes, leur autonomie et leur volonté, sans aucune discrimination selon leur état ou leurs convictions. J'interviendrai pour les protéger si elles sont affaiblies, vulnérables ou menacées dans leur intégrité ou leur dignité. Même sous la contrainte, je ne ferai pas usage de mes connaissances contre les lois de l'humanité.

J'informerai les patients des décisions envisagées, de leurs raisons et de leurs conséquences.

Je ne tromperai jamais leur confiance et n'exploiterai pas le pouvoir hérité des circonstances pour forcer les consciences.

Je donnerai mes soins à l'indigent et à quiconque me les demandera. Je ne me laisserai pas influencer par la soif du gain ou la recherche de la gloire.

Admis dans l'intimité des personnes, je tairai les secrets qui me seront confiés. Reçu à l'intérieur des maisons, je respecterai les secrets des foyers et ma conduite ne servira pas à corrompre les mœurs.

Je ferai tout pour soulager les souffrances. Je ne prolongerai pas abusivement les agonies. Je ne provoquerai jamais la mort délibérément.

Je préserverai l'indépendance nécessaire à l'accomplissement de ma mission. Je n'entreprendrai rien qui dépasse mes compétences. Je les entretiendrai et les perfectionnerai pour assurer au mieux les services qui me seront demandés.

J'apporterai mon aide à mes confrères ainsi qu'à leurs familles dans l'adversité.

Que les hommes et mes confrères m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses ; que je sois déshonoré(e) et méprisé(e) si j'y manque.

## Titre et résumé en français

### Réduction de l'impact écologique imputable aux gaz d'anesthésie au CHU de Bordeaux

**Introduction :** L'entretien de l'anesthésie générale (AG) est réalisé le plus souvent sur un mode inhalatoire (1). Ce choix, basé sur des avantages cliniques, ne prend pas du tout en compte l'impact écologique (2–5). Pourtant les professionnels de santé exerçant dans le domaine de l'anesthésie sont en première ligne pour diminuer la pollution des blocs opératoires notamment en réduisant, dès aujourd'hui, l'impact écologique des gaz d'anesthésie, halogénés et protoxyde d'azote ( $N_2O$ ), classés comme gaz à effet de serre (GES) (6–11) par l'utilisation raisonnée des débits de gaz frais (DGF) et par le choix judicieux de ces agents inhalés (9,10). Nous avons conduit une évaluation des pratiques professionnelles incluant la diffusion d'un protocole de bonne pratique d'utilisation des gaz d'anesthésie. L'objectif principal du travail est de réduire le coût écologique de l'anesthésie inhalée au CHU de Bordeaux. **Matériels & Méthodes :** Nous avons conduit une étude avant-après entre la période février-avril 2017 (phase I) et février-avril 2018 (phase II), de façon monocentrique, prospective et observationnelle. Les données, recueillies en aveugle, concernaient les modalités de ventilation mécanique et les consommations d'halogénés de l'ensemble des blocs opératoire du CHU de Bordeaux. Entre l'évaluation avant-après, avait lieu une phase d'amélioration et de retour sur expérience s'adressant à tout le personnel médical et paramédical exerçant dans le domaine de l'anesthésie au moyen de fiches mémos, mails d'informations et réunions scientifiques ainsi que la diffusion d'un protocole d'utilisation raisonnée des agents halogénés. Le critère de jugement principal était le DGF moyen utilisé pour l'entretien de l'anesthésie. Une analyse de régression logistique était prévue pour rechercher les facteurs associés à un réglage du DGF pour l'entretien  $> 2L/min$ . **Résultats :** 770 procédures d'anesthésie ont été étudiées (350 de février à avril 2017, 420 de février à avril 2018). Le DGF moyen réglé pour l'entretien de l'anesthésie générale est passé de  $1.7 \pm 1.6 L/min$  à  $1.1 \pm 0.8 L/min$  entre les phases I et II soit une réduction de 35% ( $p < 0,001$ ). Entre la phase I et la phase II, il n'y avait pas de différence significative dans l'utilisation du mode AINOC pour l'entretien de l'anesthésie (48% des cas (66/136 interventions) vs 57% des cas (122/212 interventions),  $p = 0,09$ ). Comparée à la phase 1, la consommation en agents d'anesthésie était réduite de 23% pour le sevoflurane et de 36% pour le desflurane lors de la phase II ce qui représentait une réduction d'émission en gaz à effet de serre équivalente à 51 542 kgEqCO<sub>2</sub>. En analyse multivariée, seul l'entretien de l'anesthésie sur un mode total intraveineux était associé à un réglage du DGF moyen supérieur à 2L/min. **Conclusion :** L'élaboration d'un protocole d'utilisation raisonnée des agents halogénés permet de réduire le coût carbone de l'anesthésie. La prise en compte de l'impact écologique de l'anesthésie est aujourd'hui obligatoire et justifie la poursuite de la formation des professionnels.

## Titre et résumé en anglais

### How to reduce anesthesia induced ecological impact? An example from Bordeaux University Hospital

**Background:** Volatile agents are worldwide daily used anesthetic agents. However, they are responsible for notorious greenhouse gas effect. No management program for reduction of volatile agents consumption and emission exists. The purpose of this study was to determine the effect of the implementation of a management program based on a multimodal strategy to reduce environmental impact caused by volatile agents. **Methods:** We performed an audit of clinical practice before and after implementation of the management program. This program was based on a three-stage strategy. Firstly, we prospectively evaluated professional practice regarding halogenated agents managements (phase I). Secondly, we implemented the protocol. And finally, we assessed professional practice again (after implementation) and compared the results with those of the first part (phase II). 350 procedures were included in Phase I and 420 in Phase II. We hypothesized that the management program implementation would lead to a reduction of greenhouse gas emission. The primary outcome was the reduction of mean fresh gas flow (FGF) used for maintenance of general anesthesia. **Results:** The implementation of the management program led to a 35% decrease in mean FGF between the two phases ( $1.7 \pm 1.6 L/min$  vs  $1.1 \pm 0.8 L/min$  for Phase I and Phase II respectively,  $p < 0.001$ ) which represented a 51 542 kg EqCO<sub>2</sub> reduction in green-house gas emission. **Conclusion:** The implementation of a management program for a well-reasoned use of volatile agents led to a significant reduction of greenhouse gas emission. This type of action should be undertaken to minimize the adverse effect of anesthesia on the environment.