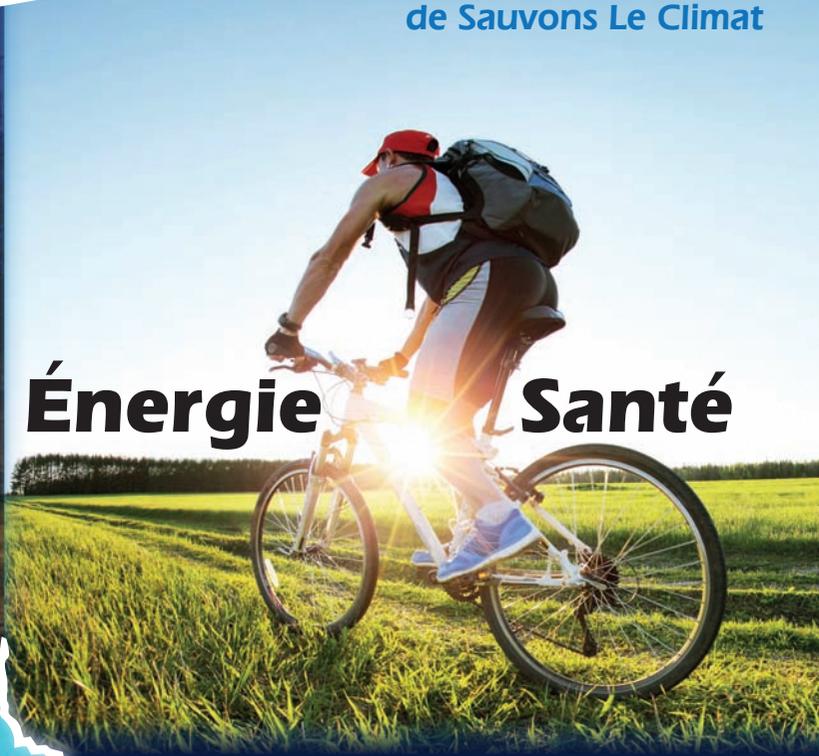


POLLUTION / ATMOSPHERIQUE

Climat, Santé, Société

Numéro spécial juin 2014

6^e Université d'été
de Sauvons Le Climat



Énergie Santé



ISSN 0032-3632

Publié avec le concours de :

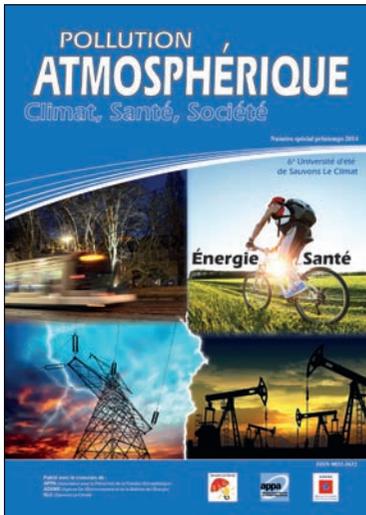
APPA (Association pour la Prévention de la Pollution Atmosphérique)

ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie)

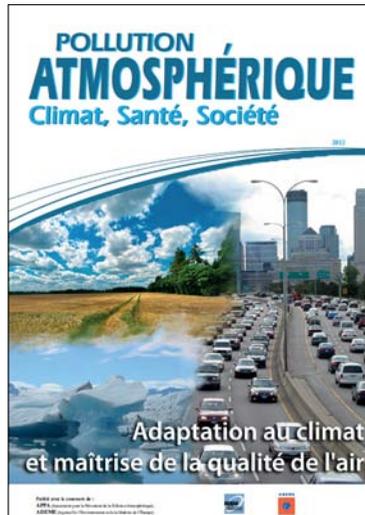
SLC (Sauvons Le Climat)



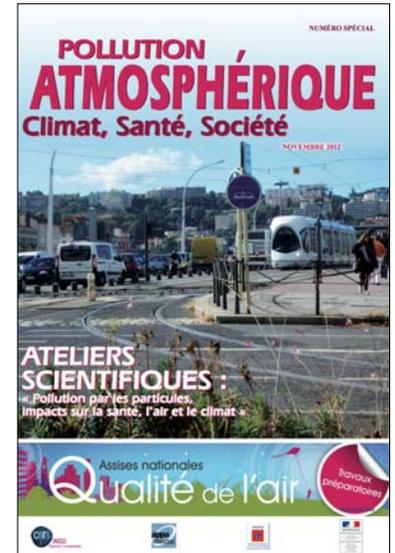
NUMÉROS SPÉCIAUX HORS SÉRIE



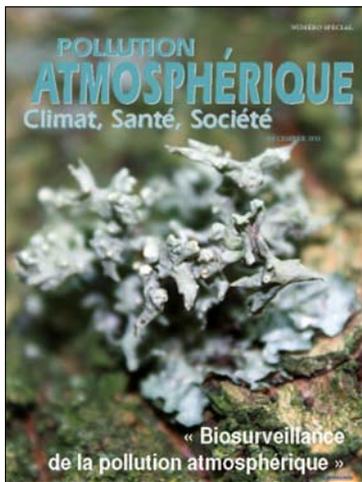
Énergie - Santé
 Juin 2014



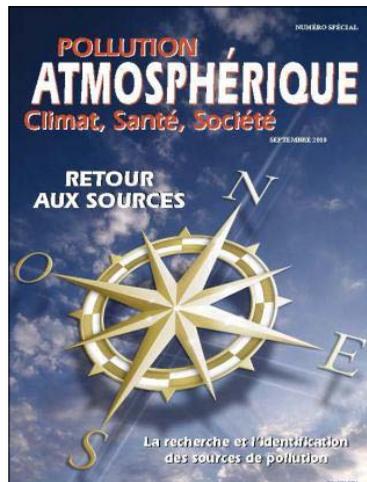
**Adaptation au climat
 et maîtrise de la qualité de l'air**
 Juin 2013



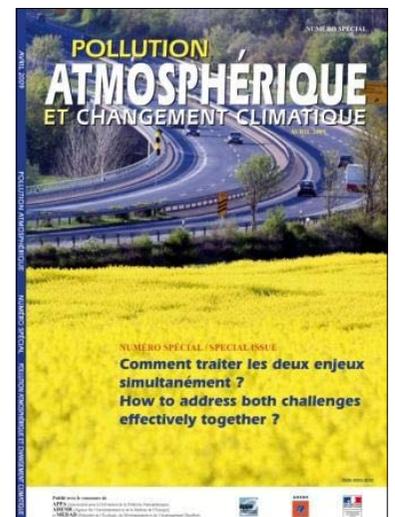
Les particules
 Novembre 2012



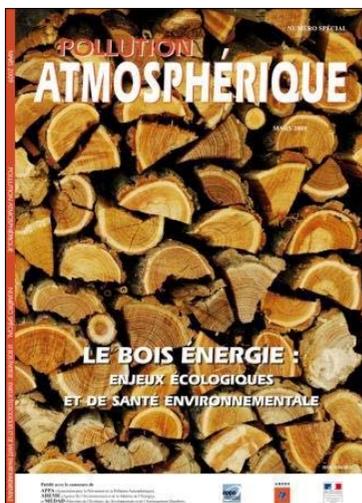
**Biosurveillance de la
 pollution atmosphérique**
 Décembre 2011



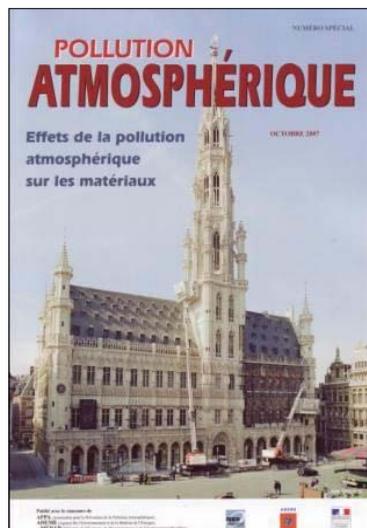
**La recherche et l'identification
 des sources de pollution**
 Septembre 2010



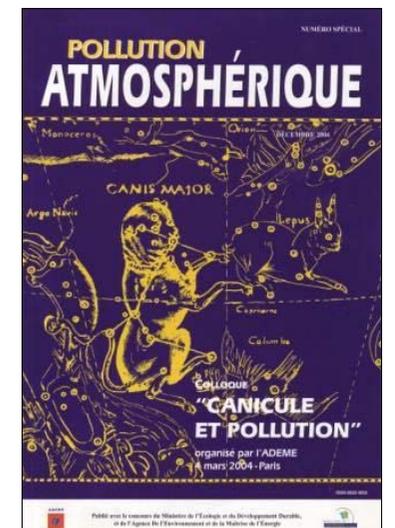
**Pollution atmosphérique et
 changement climatique.
 Comment traiter les deux enjeux
 simultanément. Avril 2009**



**Le bois énergie
 Enjeux écologiques et de
 santé environnementale**
 Mars 2009



**Effets de la pollution
 atmosphérique sur les matériaux.**
 Octobre 2007



**Colloque
 « Canicule et pollution »
 organisé par l'Ademe
 Paris. 2007**

POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

Climat, santé, société

10, RUE PIERRE BROSSOLETTE
94270 LE KREMLIN-BICÊTRE
Tél. 01 42 11 15 00 – Fax 01 42 11 15 01
Registre du Commerce - Paris 6420 17438 B
C.C.P. PARIS 21242-77 C

Commission Paritaire des Publications
et Agences de Presse n° 0106 T 80231

DIRECTRICE DE LA PUBLICATION :

I. ROUSSEL, présidente de l'APPA.

DIRECTEURS HONORAIRES :

J.-G. BARTAIRE, EDF.
† J.-M. RAMBAUD.

COMITÉ DE RÉDACTION :

B. CALVO-LOPEZ, secrétaire de rédaction.
L. CHARLES, chercheur en sciences sociales, FRACTAL.
B. FESTY, professeur honoraire des universités, Ancien président de l'APPA.
R. JUVANON DU VACHAT, Société Météorologique de France.
M. LARZILLIÈRE, président du CITEPA.
J. MASUREL, association « Sauvons le Climat ».
Y. LE MOULLEC, ancien directeur adjoint du LhVP.
B. NADER, géographe de la santé.
H. PILKINGTON, université Paris 8 Vincennes-Saint-Denis.
M. THIBAUDON, directeur du RNSA.

COMITÉ SCIENTIFIQUE :

Président : J.-M. HAGUENOER, professeur honoraire des universités.

Vice-Président : M. LARZILLIÈRE, président du CITEPA.

Membres :

P. CARREGA, professeur, Université de Nice-Sophia-Antipolis.
L. CHARLES, chercheur en sciences sociales, FRACTAL.
W. DAB, chaire Hygiène et Sécurité du CNAM.
G. DUBOIS, directeur, TEC-Conseil.
M. ERPICUM, professeur, Université de Liège.
B. FESTY, professeur honoraire des universités, ancien président de l'APPA.
L. GALSOMIÈS, Service Évaluation de la Qualité de l'Air (SEQA), ADEME.
E. GEHIN, professeur des Universités, CERE, Université de Paris Est, CERES.
G. GOUPIL, LCPP.
E. IONESCU, université de Paris-Est Créteil, CERE.
M. JAGUSIEWICZ, EFCA.
S. KIRCHNER, coordinatrice scientifique de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (CSTB).
J. KLEINPETER, directeur de l'ASPA.
J. LAMBROZO, médecin directeur du service des études médicales, EDF-GDF.
J. LARBRE, Laboratoire d'hygiène de la Ville de Paris (LhVP).
R.-A. LEFÈVRE, université de Paris-Est Créteil.
C. MANDIN, Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (CSTB).
D. MARTIN, ministère de la Recherche.
J. MASUREL, association « Sauvons le Climat ».
S. MEDINA, département Santé-Environnement, Institut de Veille Sanitaire.
I. MOMAS, université Paris V, faculté des sciences pharmaceutiques et biologiques, Laboratoire Santé Publique et Environnement.
Y. LE MOULLEC, ancien directeur adjoint du LhVP.
L. MUSSON-GENON, docteur ingénieur – EDF Pôle Industrie, Division Recherche et Développement.
B. NADER, géographe de la santé.
N. MICHELOT, Bureau de l'Air au MEDDE.
P. PAUL, professeur honoraire, président de l'APPA-Alsace.
H. PILKINGTON, université Paris 8 (Vincennes – Saint-Denis).
A. RABL, Centre d'Énergétique, École des Mines, Paris.
M. RAMEL, coordinatrice du Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA) à l'INERIS.
D. RENAUT, Société Météorologique de France (SMF).
M. THIBAUDON, directeur du RNSA.
G. THIBAUT, consultant – Membre de l'ACNUSA.
D. ZMIROU, laboratoire de Santé Publique, faculté de Médecine, université de Nancy.

ADMINISTRATEURS DE LA REVUE :

(APPA)

ASSOCIATION POUR LA PRÉVENTION DE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

reconnue d'utilité publique par le décret du 9 avril 1962,
agrée par le ministère de l'Environnement
10, rue Pierre Brossollet - 94270 Le Kremlin-Bicêtre

Présidente : Mme I. ROUSSEL

(CITEPA)

CENTRE INTERPROFESSIONNEL TECHNIQUE D'ÉTUDES DE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

7, cité Paradis - 75010 Paris

Président : M. M. LARZILLIÈRE

(RNSA)

RÉSEAU NATIONAL DE SURVEILLANCE AÉROBIOLOGIQUE
Le Plat du Pin - 69690 Brussieu

Directeur : M. M. THIBAUDON

LETTRE DE LA RÉDACTION

Ce numéro spécial dédié au thème « énergie-santé » ouvre ses colonnes à l'association « Sauvons le climat » qui a pris l'heureuse initiative de consacrer son université d'été 2013 à ce thème, jugé essentiel par la rédaction de la revue Pollution atmosphérique. En effet, au moment où l'énergie mobilise le devant de la scène politique, il n'est pas indifférent de montrer que les seuls enjeux économiques ne suffisent pas pour éclairer les décisions majeures qui se profilent pour orienter l'économie de nombreux pays au cours des années à venir.

L'énergie est une composante essentielle de la vie, et la combustion massive des énergies fossiles a permis à l'humanité de bénéficier du confort moderne, responsable de l'accroissement spectaculaire de l'espérance de vie depuis le début du XX^e siècle. La meilleure description de notre dépendance énergétique consiste à relater les conditions de vie des habitants privés d'électricité après une catastrophe, montrant que la survie ne peut s'organiser que pendant quelques heures ou, au maximum, quelques jours.

Cette université d'été, bien que s'étant déroulée sur plusieurs jours, n'a pas pu traiter de l'ensemble des questions posées par le sujet. Notamment, la mobilité, particulièrement dépendante des énergies fossiles, n'a pas été évoquée à travers les innovations technologiques qui se mettent en place, ni même le bénéfice sanitaire des mobilités douces comme le vélo ou la marche à pied qu'il convient d'encourager et de développer.

Globalement, Denis Zmirou a montré combien la diminution de l'utilisation des énergies fossiles, se traduisant par une baisse des émissions polluantes, est bénéfique pour la santé, même si ce bénéfice, évalué par l'épidémiologie, n'est pas toujours simple à quantifier, comme le rappelle André Aurengo.

En dépit du peu de temps qui leur a été consacré, les aspects sociaux n'ont pas été oubliés, tant à propos des questions de perception (Daniel Boy) que par celles interrogeant la précarité énergétique (Laure Pizay) en lien avec l'importance sanitaire accordée aux questions thermiques décrites par Michel Gautier.

Les implications économiques des choix énergétiques, largement traitées dans d'autres instances, n'ont pas été abordées, ni par le biais des économies d'énergie, ni par celui des énergies renouvelables qui posent, par ailleurs, la question de leur stockage.

La direction de la rédaction de la revue a souhaité élargir les thèmes abordés par l'université d'été de « Sauvons le climat » en donnant la parole à l'OQAI qui rappelle opportunément que la qualité de l'air intérieur ne doit pas être le point aveugle de toutes les opérations d'isolation entreprises pour diminuer la consommation d'énergies fossiles. On sait maintenant combien les mesures de restrictions énergétiques, mises en place précipitamment après les chocs pétroliers des années 1970, ont eu des effets négatifs sur la qualité de l'air intérieur qu'il convient de garder au cœur des préoccupations liées à la qualité de la vie et à la santé. De même, la rédaction de la revue a estimé indispensable de mentionner ce fléau sanitaire que constitue le CO₂, le killer dont les émanations sont meurtrières lors d'une combustion mal réglée ; Viêt Nguyen-Thanh, de la direction de l'Institut National de Prévention et d'Éducation pour la Santé (INPES) nous rappelle l'importance de la prévention dont l'efficacité n'est pas toujours aisée à évaluer.

Pour compléter l'information mise à disposition sur ce thème d'actualité que représente l'énergie, la rédaction de la revue Pollution atmosphérique a prévu de consacrer un prochain numéro à la transition énergétique et à ses implications sur la pollution atmosphérique, le climat et la société, champs d'intervention privilégiés de la revue.

Il convient de remercier les auteurs qui ont eu la patience de conformer le texte de leur communication orale aux prescriptions de la revue et aux nécessaires exigences de la publication écrite. Pour ne pas abuser de leur disponibilité, nous avons parfois pris la liberté de traduire un titre ou d'élaborer un résumé ; qu'ils veuillent bien nous excuser si le résultat n'est pas à la hauteur de ce qu'ils auraient pu faire par eux-mêmes.

Merci à tous ceux qui ont contribué à éclairer ce thème du lien entre les choix énergétiques et la santé, sujet appartenant trop souvent à une zone d'ombre des nombreux débats qui se poursuivent.

Isabelle Roussel

Directrice de la publication

SOMMAIRE

CONTENTS

Les textes sont publiés sous l'entière responsabilité de leurs auteurs. La reproduction et la traduction d'articles ou d'extraits d'articles insérés dans la Revue *Pollution Atmosphérique* sont formellement interdites sans autorisation du directeur de la publication.

Authors are entirely responsible for any texts published. Any reproduction or translation of articles or extracts published in the Journal *Pollution Atmosphérique* is expressly forbidden without permission from the Director of the Journal.

LETTRE DE LA RÉDACTION

Isabelle Roussel 3

ÉDITORIAL

Isabelle ROUSSEL, Claude JEANDRON..... 6

ANALYSES ET ENJEUX SUR LA QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR

La qualité de l'air intérieur : un enjeu pour les bâtiments performants en énergie ?
Mickaël DERBEZ..... 8

Les interventions efficaces pour prévenir les intoxications non intentionnelles au monoxyde de carbone : une synthèse de littérature
Effectiveness of interventions in preventing unintentional carbon monoxide poisoning: a review of the literature.
Viêt NGUYEN-THANH, Colette MÉNARD, Laetitia HAROUTUNIAN, Béatrice LAMBOY
.....11

UNIVERSITÉ D'ÉTÉ ÉNERGIE-SANTÉ

Énergie et santé : trois études au banc d'essai
Energy and health: three studies on test bench
André AURENGO 19

Effets sanitaires des faibles doses de rayonnements ionisants : origine et actualité d'une controverse
Health effects of low level exposure to ionizing radiation: origin and development of a controversy
Roland MASSE..... 27

La précarité énergétique : quelles solutions ? <i>What solutions for energy insecurity?</i>	
Laure PIZAY	39
Réchauffement climatique et perception des sources d'énergie <i>Climate warming and perception of energy resources</i>	
Daniel BOY	47
L'électricité est-elle le vecteur énergétique de l'avenir pour la santé publique ? <i>Is electricity the energy vector of the future for public health?</i>	
Marcel JUFER	59
Biomasse énergie, pollution atmosphérique et santé <i>Biomass energy, air pollution and health</i>	
Paul MATHIS	71
Bioremédiation des sols et des eaux : application aux pollutions chimique et nucléaire <i>Bioremediation of soil and water: application to chemical and nuclear pollutions</i>	
Alain VAVASSEUR	80
Froid, chauffage, santé <i>Cold, heat and health</i>	
Michel GAUTHIER.....	87
Pollution atmosphérique, sources urbaines et santé : un lien documenté de manière de plus en plus précise <i>Atmospheric pollution, urban sources and health: a link documented in a more and more precise way</i>	
Denis ZMIROU	97
Quelques réflexions en contrepoint du colloque « Énergie et santé »...	
Yves BRÉCHET	102

ÉDITORIAL

Isabelle ROUSSEL, Claude JEANDRON

Ce numéro spécial est le fruit de la rencontre de deux associations, l'APPA et « Sauvons le climat » qui sont des réseaux d'experts ayant pour ambition de mettre à la disposition de tous ceux qui veulent réfléchir avant d'agir, des réflexions et des informations validées scientifiquement. Les enjeux liés au climat sont parmi nos préoccupations communes et, selon les rapports du GIEC, « la maison brûle » et Chris Field, vice-président du GIEC, déclarait au moment de la parution du 5^e rapport du groupe II : « Quand on regarde les principales conclusions de ce rapport, on note que ce qui est le plus important, c'est que nous ne sommes pas à l'époque où le changement climatique est une sorte de futur hypothétique. Nous vivons dans un monde où les changements climatiques ont déjà opéré et ont des impacts fréquents et conséquents. Nous constatons ces incidences depuis les pôles jusqu'à l'équateur et des côtes aux montagnes. »

En 2013, la revue *Pollution atmosphérique, climat, santé, société* avait consacré un volumineux numéro spécial à « l'adaptation au climat et la maîtrise de la qualité de l'air ». Le responsable de cette publication, Daniel Martin, précisait dans l'introduction que les questions liées à l'énergie n'avaient pas pu être abordées en 2013 et qu'elles le seraient ultérieurement.

Or, en septembre 2013, Sauvons le Climat a réuni pendant deux jours en université d'été, à Aix-en-Provence, les meilleurs spécialistes autour du thème « Énergies et santé » puisque, dans les nombreux débats qui ont lieu au sujet de la transition énergétique, le lien entre énergie et santé est peu abordé. Cette habitude estivale permet de prendre le temps de la réflexion, des échanges et des débats pour traiter annuellement une question.

Nous remercions les organisateurs de cette université d'été d'avoir fait l'effort, avec ce numéro spécial, de ne pas limiter la portée des débats sur ces sujets essentiels à un cénacle restreint, mais d'avoir accepté de mettre les informations

présentées à la disposition de tous. En effet, il ne suffit pas de réunir les meilleurs spécialistes sur ces questions difficiles, il est essentiel, pour nos associations, d'avoir le souci de diffuser largement ces connaissances pour contribuer à forger des citoyens éclairés et aptes à envisager des choix énergétiques qui engagent l'avenir de la planète. En effet, trop souvent, l'opinion publique, non préparée à assimiler ces notions parfois ardues, rejette les solutions pourtant les plus efficaces et les plus inoffensives.

Bien sûr, le climat apparaît en filigrane derrière toutes les interventions recueillies dans le numéro que nous vous présentons, puisque la maîtrise du CO₂ interroge mécaniquement les modes de production de l'énergie. Or ceux-ci, sous prétexte de diminuer les émissions de CO₂ et donc d'être favorables à la maîtrise du changement climatique, ne peuvent pas pénaliser la santé des habitants.

Sur ces thèmes, la synergie entre l'APPA et « Sauvons le climat » prend tout son sens, puisque la mobilisation des politiques en faveur du climat ne peut que s'appuyer sur les décisions à prendre pour améliorer la qualité de l'air en conjuguant ainsi les bénéfices à obtenir, à la fois sur le court terme et sur le moyen terme.

Certes, en trois jours, même dans le cadre enchanteur et propice à la créativité qu'est la bastide de La Baume, il n'est pas possible d'envisager tous les aspects de cette passionnante question qui remet l'homme au cœur des enjeux économiques auxquels l'énergie est souvent associée. Néanmoins, plusieurs aspects ont été abordés, depuis des réflexions plus méthodologiques sur l'épidémiologie jusqu'aux modes de chauffage, en passant, bien sûr, par la question de la pollution atmosphérique, sans oublier des aspects plus sociaux comme celui de la précarité énergétique ou de la perception du changement climatique. Y. Bréchet, haut-commissaire à l'énergie atomique, a conclu ces débats avec beaucoup de recul et de hauteur de vue.

Nous tenons à remercier les auteurs qui ont accepté de se livrer à l'exercice difficile du passage d'une communication orale à un texte rédigé selon les normes exigeantes de notre revue. Bien sûr, la richesse des débats ne transparaît pas dans les contributions, mais cette frustration ne peut que vous inviter à venir participer à la prochaine université d'été, qui aura lieu aussi sur le thème du climat, à Bordeaux les 3 et 4 octobre 2014 (<http://www.sauvonsleclimat.org/>

[universite-dete-2014-de-slc/](http://www.sauvonsleclimat.org/universite-dete-2014-de-slc/)).

Le présent numéro spécial de votre revue constitue un recueil des communications qui y ont été présentées. Il pourra servir à toutes celles et ceux qui souhaitent s'appuyer sur ces travaux pour tenter d'expliquer les impacts sanitaires des solutions qui se présentent à nous pour contrer les dérèglements climatiques.



Sauvons le Climat est un collectif d'associations qui rassemble au total plus de 30 000 membres ; il se donne une mission d'information sur ce qui constitue la plus grande menace qui pèse sur notre planète et qui est générée par l'homme lui-même : les bouleversements climatiques provoqués par les rejets massifs de gaz à effet de serre (dont le dioxyde de carbone en premier lieu) depuis le début de l'ère industrielle et amplifiés par la démographie en croissance rapide et l'accès au développement de grandes nations émergentes.

Nous nous donnons aussi comme objectif de proposer des solutions pour contrer ces changements, et de ne pas rester inactifs devant ces menaces.

Sauvons le Climat a la particularité de réunir d'éminents experts de nombreux domaines car elle est très attachée à l'approche scientifique de ces problèmes, à la proposition de solutions argumentées et adaptées à nos sociétés, et à notre portée, à la fois sur le plan technologique et sur le plan économique.

Tous nos travaux, toutes nos études, tous nos échanges révèlent régulièrement que les changements climatiques en cours ont et auront longtemps des effets sur la santé des hommes. Effets directs et brutaux pour certains par les catastrophes climatiques ou les périodes de sécheresse par exemple... Effets indirects pour d'autres car le déplacement des zones de culture, la montée du niveau des mers, l'extension de zones à risques épidémiques... conduiront à des expositions différentes et évolutives aux risques induits.

Les solutions susceptibles de faire reculer la menace doivent elles-mêmes être bien choisies pour ne pas affecter encore plus la santé de l'humanité. Et dans ce débat, les différentes sources d'énergie ou nos façons de les convertir ou de les utiliser tiennent une grande place : quels sont les impacts comparés des grandes sources fossiles, nucléaires, renouvelables ? Quels sont les transports, les moyens de chauffage les moins nocifs ? Les sources naturelles et renouvelables comme la biomasse, la géothermie, le solaire sont-elles totalement inoffensives ?

L'association, grâce à son panel d'experts et à son conseil scientifique, très réactifs, alimente régulièrement son site Internet <http://www.sauvonsleclimat.org/> sur lequel de nombreux documents et avis d'experts sont accessibles sur les sujets relatifs à l'énergie et au climat. Compte tenu de la place tenue dans le débat public sur ces thèmes techniques et pointus, il est conseillé à chacun de s'informer pour se forger une opinion argumentée au-delà des idées toutes faites, trop souvent portées par la vague médiatique.

ANALYSES ET ENJEUX SUR LA QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR

La qualité de l'air intérieur : un enjeu pour les bâtiments performants en énergie ?

Mickaël DERBEZ

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) ; Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) ; chef de projet du programme OQAI-BPE

Afin de lutter contre le changement climatique, la France s'est engagée à diviser par quatre ses émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) à l'horizon 2050 par rapport à 1990 (JORF, 2005 et 2009). Les mesures prises portent en priorité sur la baisse de la consommation d'énergie des bâtiments et la réduction des émissions de GES des secteurs des transports et de l'énergie. Pour le secteur du bâtiment, représentant près du quart des émissions nationales de GES, un plan de réduction des consommations énergétiques des constructions neuves et de rénovation thermique des constructions existantes a été mis en œuvre.

Pour les nouvelles constructions, les exigences de la réglementation thermique en France se sont renforcées progressivement, et la réglementation thermique 2012 (RT 2012) applicable depuis le 1^{er} janvier 2013 vise à construire des bâtiments plus performants en énergie. Les bâtiments d'habitation neufs doivent notamment présenter une consommation conventionnelle maximale d'énergie primaire inférieure à 50 kWh/m².an en moyenne sur le territoire, et respecter des exigences d'étanchéité à l'air de leur enveloppe (JORF, 2010).

Dans la future réglementation thermique prévue à l'horizon 2020 (RT 2020), l'objectif est d'ores et déjà de construire des bâtiments encore plus performants dits à « énergie positive » qui produiront d'avantage d'énergie qu'ils n'en consomment.

Pour les bâtiments existants, l'État français a fixé comme objectif de réduire leurs consommations d'énergie d'au moins 38 % entre 2009 et 2020 (JORF, 2009). Les actions engagées visent à rénover les bâtiments de l'État et de ses

établissements publics, l'ensemble du parc de logements sociaux, et à mettre en place des incitations financières destinées à encourager la réalisation des travaux pour le parc résidentiel privé. La réglementation thermique des bâtiments existants (RT existant) fixe par ailleurs des exigences visant à ne pas dégrader les conditions d'aération et à atteindre des performances thermiques minimum lors de travaux de rénovation (JORF, 2007 et 2008).

La feuille de route pour la transition écologique prévoit que le Plan de rénovation thermique des logements s'accompagne d'une vigilance particulière sur la qualité de l'air intérieur. L'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments doit également constituer une opportunité pour traiter la question de la qualité de l'air et de la ventilation. Il est important de trouver un bon compromis entre renforcement de l'enveloppe du bâtiment et aération. Dans les bâtiments dont la perméabilité à l'air a été diminuée (réduction des infiltrations d'air), le bon fonctionnement et l'entretien régulier des systèmes de ventilation sont cruciaux.

En complément de ce plan et afin d'accélérer le processus, le ministère en charge du Logement a lancé, en novembre 2013, une démarche de concertation nommée « Objectifs 500 000 » qui devrait permettre d'atteindre, d'ici à 2017, des objectifs de construction de 500 000 logements et de rénovation de 500 000 logements par an.

La prise en compte des aspects de qualité d'air intérieur se renforce notamment grâce aux mesures du plan national d'actions sur la qualité de l'air intérieur¹, publié en octobre 2013 par les ministères en charge de l'Écologie, de la Santé et du Logement. Ainsi, des actions de réduction

des sources de pollution sont engagées avec l'incitation à utiliser des produits de construction et de décoration classés A+ en termes d'émissions de polluants volatils dans les achats et marchés publics, et le développement du volet sanitaire des Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES). Par ailleurs, il est prévu, pour la ventilation, la mobilisation des professionnels du bâtiment et des services de l'État effectuant les contrôles des règles de construction sur la qualité de l'installation des systèmes, ainsi que, dans le cadre des labels réglementaires de la RT 2012, un constat visuel de la bonne installation des équipements de ventilation.

À ce jour, les connaissances scientifiques disponibles sur la qualité sanitaire des bâtiments performants en énergie sont peu nombreuses, comme l'atteste la première revue de littérature réalisée sur le sujet en 2009 par Crump *et al.* (2009). En 2013, Teichman *et al.* (2013), sur la base de la synthèse d'études de cas publiées dans la revue *High Performing Buildings* de l'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), ont pointé l'absence de données de qualité d'air intérieur dans ces bâtiments. La même année, des priorités de recherches sur la santé et le confort des occupants dans ces bâtiments ont été proposées en Europe par Wargocki *et al.* (2013) et, en Californie, par Levin et Phillips (2013).

Pour compléter ces études par des mesures *in situ*, l'Observatoire de la qualité de l'air inté-

rieur, par le biais du CSTB, son coordinateur scientifique, a engagé un programme dédié aux Bâtiments Performants en Énergie (BPE), de façon à obtenir des mesures et données détaillées des concentrations de polluants, de débits d'air et de confort des bâtiments à usage d'habitation, d'enseignement et de bureaux, répondant aux réglementations les plus récentes en matière de performance énergétique et en situation d'occupation. C'est dire l'importance accordée à ce sujet. Ce dispositif unique en France, dénommé « OQAI-BPE », repose sur le principe de constitution progressive d'un fonds commun de données obtenues *via* la mise en œuvre, par des opérateurs locaux volontaires, d'un protocole harmonisé de mesurage, de collecte et de transferts d'informations développé par l'OQAI avec ses partenaires scientifiques et techniques². Le protocole est mis gratuitement à disposition des opérateurs locaux autofinancés, et l'OQAI leur procure son assistance. Les données ainsi collectées sont intégrées dans une base de référence nationale gérée et exploitée par l'OQAI. Les opérateurs et les financeurs locaux disposent d'un retour d'information sur leurs bâtiments, tandis que l'ensemble des données anonymisées constitue le premier socle de connaissances sur la qualité de l'air et le confort dans ces bâtiments en France. À ce jour, plus d'une centaine d'enquêtes ont été réalisées par une vingtaine d'opérateurs en association notamment avec le Programme de Recherche et d'Expérimentation sur l'Énergie dans le Bâtiment (PREBAT). La première exploitation des données collectées sera réalisée au cours de l'été 2014.

1. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Plan_QAI__23_10_2013.pdf

2. ADEME, AIR&BIO, Air Normand, Air Rhône-Alpes, ASPA, CETE Nord-Picardie, CETE de l'Ouest, CERTES/université Paris-Est Créteil, COSTIC, DHUP, EHESP, École des Mines de Douai, HUS/Service pneumologie, INERIS/LCSQA, LCPP, LHVP, PEUTZ, université Cergy-Pontoise, université Lyon 1/ CNRS écologie microbienne.

Références bibliographiques

- Crump D.R., Dengel A., Swainson, M. (2009). Indoor air quality in highly energy efficient homes – a review. *NHBC Foundation report NF18*, Published by IHS BRE Press on behalf of the NHBC Foundation.
- JORF. (2005). Loi n° 2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique. *Journal Officiel de la République Française*, n° 163, 14 juillet, p. 11570.
- JORF. (2007). Arrêté du 3 mai 2007 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants. *Journal Officiel de la République Française*, n° 114, 17 mai, p. 9538.
- JORF. (2008). Arrêté du 13 juin 2008 relatif à la performance énergétique des bâtiments existants de surface supérieure à 1000 m² lorsqu'ils font l'objet de travaux de rénovation importants. *Journal Officiel de la République Française*, n° 184, 8 août, p. 12656.
- JORF. (2009). Loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement (1). *Journal Officiel de la République Française*, n° 179, 5 août, p. 13031.
- JORF. (2010). Arrêté du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments. *Journal Officiel de la République Française*, n° 250, 27 octobre, p. 19260.
- Levin H, Phillips T. *Indoor Environmental Quality Research Roadmap 2012-2030: Energy-Related Priorities*. Final draft, 162 pages. <http://www.buildingecology.com/articles/indoor-environmental-quality-research-roadmap-201220132030-energy-related-priorities/>.
- Teichman K., Emmerich S., Persily A. (2013). Indoor air quality in high-performing building case studies: a wealth of intent, a dearth of data. *ASHRAE's High Performing Buildings magazine*, n° 6, p. 34-43.
- Wargocki P., Sherman M., de Gids W. *et al.* (2013). *Proposed Research Agenda for Achieving Indoor Air Quality Supporting Health and Comfort in Highly Energy Efficient Buildings*, Report.

Les interventions efficaces pour prévenir les intoxications non intentionnelles au monoxyde de carbone : une synthèse de littérature

Effectiveness of interventions in preventing unintentional carbon monoxide poisoning: a review of the literature.

Viêt NGUYEN-THANH, Colette MÉNARD, Laetitia HAROUTUNIAN, Béatrice LAMBOY
direction des affaires scientifiques, Institut National de Prévention et d'Éducation pour la Santé (INPES), Saint-Denis, France.

Résumé

Dans cet article, nous faisons le point sur les connaissances scientifiques concernant les interventions efficaces à distance pour prévenir les intoxications non intentionnelles au monoxyde de carbone. Cette synthèse a été réalisée selon une méthode spécifique de sélection, d'analyse de la littérature scientifique et de classification des interventions retenues.

Ce travail n'a permis d'identifier qu'il n'existe qu'un très petit nombre d'évaluations scientifiques portant sur des actions de prévention des intoxications au monoxyde de carbone, et montre l'insuffisance des travaux scientifiques sur ce sujet. Les méthodes d'évaluations employées présentent souvent des biais et limites importants. Il existe en revanche un grand nombre de recommandations sur ce sujet, diffusées par des organismes internationaux reconnus (ministères chargés de la Santé, Centers for Disease Control and Prevention). L'ensemble des documents collectés tend à conforter les autorités sanitaires dans les choix des messages de prévention diffusés en France depuis plusieurs années : incitation à faire vérifier les appareils susceptibles d'émettre du monoxyde de carbone, utilisation adéquate desdits appareils, aération du logement, repérage des symptômes d'intoxication, notamment. Ce travail de synthèse ne permet cependant pas de savoir quelles sont les actions ou interventions qui permettraient l'appropriation efficace de ces messages par la population, et leur application ; afin d'en savoir davantage à ce sujet, des études évaluatives rigoureuses restent à conduire.

Abstract

The purpose of this paper is to review the current scientific knowledge on health promotion interventions aimed at preventing unintentional carbon monoxide poisoning. The current state of knowledge in this area was assessed based on a specific method involving selection, a literature review and a classification of mental health promotion interventions identified using scientific databases.

We only found a few articles displaying scientific evaluations on that subject. However we found a great number of guidelines and recommendations released by respectable international organisms (Departments of Health, Centers for Disease Control and prevention...). In brief, those documents reinforce the choices made by French public authorities to prevent carbon monoxide poisoning, in terms of prevention messages: do have your heating system serviced by a qualified technician every year, don't heat your house through inappropriate devices, open your windows every day... but they do not provide us any clue regarding the way those messages have to be released to be efficiently enforced by people. Those findings may also encourage professionals to set up rigorous evaluations when implementing programs aimed at preventing carbon monoxide poisoning.

Mots-clés

Monoxyde de carbone, intoxication, prévention, efficacité.

Keywords

Carbon monoxide, poisoning, health promotion, program effectiveness.

Introduction

Le monoxyde de carbone (CO) est un gaz incolore et inodore, potentiellement mortel, qui peut être émis par les appareils de chauffage ou de cuisine à combustion (au gaz, au charbon, au bois...) dans des conditions de combustion incomplète. En France métropolitaine, les intoxications au monoxyde de carbone surviennent essentiellement pendant la saison hivernale (de début septembre à fin mars) et notamment pendant les pics de froid ; d'après les données de l'Institut de Veille Sanitaire, au cours de la saison de chauffe 2012-2013, 1 187 épisodes d'intoxication ont été recensés, concernant 3 855 personnes. Ces épisodes ont conduit à 40 décès (Institut de Veille Sanitaire, 2013).

Les gestes de prévention face aux risques d'intoxications non intentionnelles sont bien identifiés par les experts : principalement, il s'agit de faire vérifier chaque année, par un professionnel qualifié, les appareils susceptibles d'émettre du monoxyde de carbone, d'utiliser correctement les chauffages d'appoint (limitation de la durée d'utilisation en continu) et groupes électrogènes (à ne pas placer à l'intérieur des bâtiments), d'aérer chaque jour son domicile, et de savoir reconnaître les symptômes d'intoxication (INPES, 2010). Ces gestes préventifs sont cependant nombreux, ce qui rend probablement difficiles leur mémorisation et leur appropriation par la population. L'Institut National de Prévention et d'Éducation pour la Santé (INPES) a diffusé, entre 2005 et 2010, plusieurs campagnes de communication afin de faire connaître et adopter ces gestes. Les études évaluatives ayant accompagné ces actions d'information montrent qu'elles ont pu contribuer à améliorer la notoriété du monoxyde de carbone entre 2006 et 2009¹ ; malgré cela, un déficit de connaissances sur les sources potentielles de CO et sur les gestes de prévention subsiste².

Comment améliorer les connaissances de la population et faire adopter les comportements de prévention de manière efficace ? Certains types d'interventions ont-elles été validées par des évaluations scientifiques ? Faut-il hiérarchiser les gestes de prévention et les prioriser en fonction de leur efficacité, afin d'aider la population à les appliquer ?

Afin d'identifier les stratégies d'intervention efficaces pour faire connaître et développer les comportements préventifs, nous avons souhaité faire le point sur les données de la littérature

scientifique et sur les recommandations internationales.

Méthode

Afin d'identifier les interventions validées en prévention des intoxications au monoxyde de carbone, nous avons souhaité nous appuyer sur les synthèses de littérature les plus récentes, dont la qualité est reconnue en santé publique et par la communauté scientifique. À l'aide d'une démarche standardisée, il s'agit d'effectuer une synthèse des synthèses de littérature les plus récentes publiées sur le sujet par la Cochrane, dans des revues scientifiques ou dans le cadre de rapports produits par des organismes français ou étrangers reconnus : Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale (INSERM), Haute Autorité de Santé (HAS), Organisation Mondiale de la Santé (OMS), Centers for Disease Control and prevention (CDC), National Institute for Health and Clinical Excellence (NICE), Institut National de Santé Publique du Québec (INSPQ), Institute of Health Economics canadien, notamment. S'il n'y a pas ou peu de synthèses de littérature publiées sur le sujet, il s'agit de chercher des articles scientifiques dits primaires traitant d'interventions évaluées, et d'en synthétiser les résultats.

Pour compléter ces résultats, nous avons souhaité identifier les recommandations des organismes internationaux reconnus susmentionnés en matière de prévention des intoxications CO. Ces recommandations ne s'appuient pas nécessairement sur une revue de littérature, leur portée est donc différente, et complémentaire de celle des synthèses s'appuyant sur des données scientifiques.

Dans le cadre de cette recherche, nous avons utilisé des mots-clés nous permettant d'identifier des documents portant spécifiquement sur la prévention des intoxications au monoxyde de carbone, mais aussi de façon plus générale sur la qualité de l'air intérieur, le CO pouvant faire l'objet de chapitres particuliers dans des revues plus générales sur l'air intérieur. Nous avons ainsi choisi d'interroger les bases de données Medline et Cochrane Library (cette dernière inclut les bases de données HTA, DARE, NHS, Cochrane Database of Systematic Reviews). Les mots-clés MeSH suivants ont été utilisés : Carbon Monoxide, Carbon Monoxide Poisoning, Health promotion. La recherche a été finalisée en

décembre 2012 ; nous n'avions pas fixé de limite de date ou de langue.

Résultats

1. Résultats de la recherche documentaire

La recherche documentaire a été arrêtée en décembre 2012. Trois revues de littérature ont été identifiées, dont deux portaient spécifiquement sur la prévention du monoxyde de carbone. Après examen, deux de ces revues ont été exclues de la synthèse : l'une traitait des bonnes pratiques pour gérer les intoxications au monoxyde de carbone une fois survenues (Mandal *et al.*, 2011) ; une synthèse de l'OMS sur la qualité de l'air intérieur comportait un chapitre sur le monoxyde de carbone, mais qui traitait des seuils d'exposition, et non des mesures de prévention (WHO, 2010). La dernière synthèse a été retenue et analysée (Raub *et al.*, 2000).

Sept articles ou documents primaires présentant des évaluations d'interventions de prévention CO ont été identifiés et analysés (Yoon *et al.*, 1998 ; Schwartz *et al.*, 2010 ; Ryan and Arnold, 2011 ; Lin and Connors, 2005 ; Galada *et al.*, 2009 ; Clifton *et al.*, 2001 ; Institut National de Santé Publique du Québec, 2010).

Une dizaine de pages Internet ou de supports de communication présentant les recommandations d'organismes internationaux en matière de prévention CO a été identifiée.

2. Synthèse de la littérature scientifique

2.1. Conclusions de la synthèse de littérature

Pour réaliser leur synthèse de littérature publiée en 2000, Raub *et al.* (2000) se sont appuyés sur « une revue de la littérature scientifique et les avis professionnels des auteurs ». Les recommandations de l'article ne sont cependant pas toujours étayées par des références, si bien qu'il n'est pas aisé de s'assurer que chacune d'entre elles repose sur des évaluations. En matière de prévention, les auteurs recommandent une vérification fréquente et une maintenance correcte des appareils à combustion, de ne pas laisser le moteur d'une voiture

fonctionner dans un lieu clos, d'utiliser correctement les appareils de chauffage ou de cuisine d'appoint, et enfin d'installer des détecteurs de monoxyde de carbone.

2.2. Revue des évaluations « primaires »

Nous présenterons les résultats des articles primaires présentant des évaluations d'interventions selon leur date de publication, du plus ancien au plus récent.

L'article de Yoon *et al.* (1998) est ancien, mais fut publié dans une revue à facteur d'impact élevé et cité par de nombreux autres auteurs. Il s'agit d'une étude de cas portant sur la période 1980-1995 dans l'État du Nouveau-Mexique aux États-Unis. Les auteurs ont évalué le nombre de décès non intentionnels qui auraient pu être évités grâce à des détecteurs CO, à partir du registre des décès. Ils estiment que 78 décès (sur 136) auraient pu être évités grâce à des détecteurs CO sonores (victimes endormies au moment de l'intoxication). Notons que les auteurs ont fait ces estimations en considérant que les appareils auraient tous fonctionné correctement, sans défaillance technique. Leurs recommandations portent sur la nécessité de conduire des campagnes de communication afin d'inciter la population à limiter le risque d'émanation de monoxyde de carbone dans les résidences et véhicules, et sur la diffusion d'informations sur les détecteurs CO (utilité, limites, et nécessité de les tester régulièrement).

Dans leur article de 2001, Clifton *et al.* (2001) présentent l'étude d'une revue de presse systématique nationale (presse, télévision, radio) conduite entre 1994 et 1998 aux États-Unis pour repérer les cas d'intoxication CO et les circonstances associées (équipement en détecteurs ou pas). L'objectif des auteurs était notamment d'évaluer l'impact de la présence de détecteurs CO sur les intoxications. 4 564 épisodes d'intoxication ont été recensés. Les taux de décès (nombre de décès rapportés au nombre de personnes exposées) semblent moins élevés dans les villes où les détecteurs CO sont obligatoires. 1 008 victimes d'intoxications ont attribué leur survie à la présence de CO détecteurs.

L'objectif de l'article de Lin et Connors (2005) était d'évaluer l'efficacité de campagnes d'information et d'éducation pour réduire la morbidité et mortalité dues aux intoxications CO durant

une tempête de glace. Pour ce faire, ils ont comparé le nombre des victimes de deux tempêtes à Rochester (dans l'État de New York) en 1991 et 2003, sachant qu'en 2003 il y avait eu davantage de messages de prévention dans les médias et par l'intermédiaire des professionnels de santé. Leurs investigations montrent que ces efforts éducationnels, combinés à des actions spécifiques comme l'étiquetage de certains produits (tablettes de charbon destinées aux barbecues, afin d'éviter leur utilisation en intérieur), ont pu avoir des effets modestes sur le nombre de victimes d'intoxications se présentant aux urgences (55 en 1991, 45 en 2003). Les auteurs soulignent cependant que ces effets peuvent aussi s'expliquer par la durée moindre de la tempête en 2003. En conclusion, ils recommandent de combiner des actions d'information du public ainsi que des actions de terrain, comme l'installation de détecteurs CO.

Dans leur article de 2009, Galada *et al.* (2009) rapportent l'évaluation d'une communication sous forme de bande dessinée, dont l'objectif est d'inciter les ménages pauvres du Nord du Mexique à se protéger du risque d'intoxication CO, notamment en s'équipant de détecteurs CO. Ils utilisent le *mental model*, qui consiste à combiner les connaissances d'experts et du grand public pour construire une intervention, en explorer les freins à l'adoption d'un comportement et les déficits de connaissances grâce à des enquêtes répétées (pré- et post-tests) (Morgan *et al.*, 2002), cité dans (Galada *et al.*, 2009). Ils créent un outil de communication à partir de ces résultats, sous forme d'une brochure en bande dessinée. Selon les auteurs, l'évaluation est concluante : elle permet en effet d'augmenter les connaissances des participants. Par exemple, la proportion de personnes qui connaissent l'utilité d'une alarme CO passe de 29 % avant lecture, à 86 % après lecture. L'intention d'utiliser une alarme CO passe de 70 % à 89 %. La recommandation des auteurs est de diffuser ce type de communication, adaptée à la cible et à ses freins.

L'article de Schwartz *et al.* (2010) présente l'évaluation d'un programme de prévention implanté à New York et basé sur un atelier d'information de trente minutes, la distribution gratuite de CO détecteurs, et sur un appel téléphonique de suivi. Ce programme a été développé à partir du modèle théorique de changement de comportement *Health Belief model*, dans l'objectif de lever les obstacles qui freinent l'adoption du comportement protecteur : par exemple,

la distribution gratuite de détecteurs permet de contourner le problème du coût de l'appareil pour les foyers modestes. 133 foyers ont participé au programme. 1 mois après l'atelier de prévention, 91 % d'entre eux ont déclaré avoir installé les détecteurs CO, et globalement les connaissances sur les sources potentielles de monoxyde de carbone ont augmenté.

L'Institut National de Santé Publique du Québec (INSPQ) a publié en 2010 un rapport portant sur l'évaluation de trois brochures grand public sur le monoxyde de carbone (Institut National de Santé Publique du Québec, 2010) : *Un avertisseur de monoxyde de carbone peut sauver des vies* (2001) ; *Le monoxyde de carbone tue* (2005) ; et *Vacanciers, soyez vigilants!* (2001). Une analyse textuelle, des *focus groups* avec les cibles potentielles des outils, et des rencontres avec leurs rédacteurs ont permis d'identifier les forces et faiblesses de chacun des outils. La lisibilité et la compréhension des messages ont été jugées perfectibles par les auteurs de l'étude, qui recommandent aux concepteurs de prendre davantage en compte les capacités et le point de vue réel des lecteurs potentiels, et de pré-tester et post-tester les outils.

L'article de Ryan *et al.*, publié en 2011, présente les résultats d'une étude pilote destinée à évaluer la qualité et l'efficacité des détecteurs CO (Ryan et Arnold, 2011). 30 appareils ont été prélevés dans des logements (sur la base du volontariat de leurs propriétaires). Sur les 30 appareils testés, la moitié n'ont pas fonctionné correctement, se déclenchant trop tôt (17 %) ou trop tard (40 %). Au final, dans 2 cas sur 5, les appareils testés ne protégeaient pas leurs propriétaires des risques d'intoxication. Les auteurs relèvent un possible lien entre l'ancienneté de l'appareil et les dysfonctionnements.

3. Synthèse des recommandations d'organismes internationaux

Nous avons identifié une dizaine de pages Internet ou de documents d'information formalisant des recommandations grand public concernant la prévention des intoxications CO, et émanant des Centers for Disease Control and Prevention américains, d'organismes de prévention rattachés à certains États américains, des

ministères chargés de la Santé britannique et québécois.

Ces recommandations restent relativement proches des recommandations françaises, si ce n'est que la plupart comportent également un conseil spécifique concernant l'équipement en détecteurs de monoxyde de carbone (Centers for Disease Control and Prevention, 2005 ; Department of Health, 2008 ; ministère chargé de la Santé et des Services sociaux du Québec, 2005 ; National Health Service (NHS), 2012). Selon ces organismes, les détecteurs CO sont complémentaires des autres mesures de prévention, car même s'ils n'empêchent pas les émissions toxiques, ils permettent d'alerter lorsqu'elles surviennent.

Certains conseils spécifiques sont parfois ajoutés aux recommandations globales (liste non exhaustive) :

- ne pas faire fonctionner le moteur d'un véhicule dans un garage relié à une habitation (Centers for Disease Control and Prevention, 2005 ; ministère chargé de la Santé et des Services sociaux du Québec, 2005 ; National Health Service (NHS), 2012).
- ne rien faire brûler dans un endroit non ventilé (Centers for Disease Control and Prevention, 2005 ; ministère chargé de la Santé et des Services sociaux du Québec, 2005).
- ne pas chauffer son habitation à l'aide de fours à gaz (Centers for Disease Control and Prevention, 2005 ; ministère chargé de la Santé et des Services sociaux du Québec, 2005 ; National Health Service (NHS), 2012).
- ne pas dormir dans une pièce où fonctionne un chauffage dont les gaz sont évacués directement dans la pièce (National Health Service (NHS), 2012).
- équiper sa cuisine d'une hotte d'aspiration (National Health Service (NHS), 2012).
- s'assurer qu'il n'y a pas de fuite dans les conduits d'évacuation des gaz des appareils de chauffage ou de la cheminée (ministère chargé de la Santé et des Services sociaux du Québec, 2005).
- s'assurer que sa cheminée n'est pas obstruée par des nids d'oiseaux ou autre débris, ou par une accumulation de neige ou de glace (ministère chargé de la Santé et des Services sociaux du Québec, 2005).
- l'hiver, enlever la neige autour de son véhicule en prenant soin de bien dégager le tuyau d'échappement avant de mettre le moteur en marche (ministère chargé de la Santé et des Services sociaux du Québec, 2005).

- ne jamais actionner le démarreur à distance d'un véhicule à moteur lorsque celui-ci est dans un garage attenant ou un abri temporaire (ministère chargé de la Santé et des Services sociaux du Québec, 2005).

- guetter les signes d'une combustion incomplète dans les appareils à combustion, comme lorsque la flamme de contrôle est jaune ou orange au lieu d'être bleue, ou lorsqu'elle s'éteint fréquemment (Department of Health, 2008).

- être attentif aux traces de suie ou aux taches brunes autour des appareils à combustion, sur les murs, par exemple (Department of Health, 2008).

Discussion

Notre recherche documentaire montre l'insuffisance des travaux scientifiques sur l'efficacité des actions de prévention du monoxyde de carbone. Les méthodes d'évaluations employées restent souvent relativement simples (pas d'étude expérimentale avec groupe contrôle) et présentent des biais et limites importants, d'ailleurs soulignés par les auteurs.

Les études présentées montrent que certaines actions d'information, comme des bandes dessinées adaptées au public ciblé ou des ateliers d'information, peuvent avoir un effet sur le niveau de connaissances concernant le risque CO, les sources potentielles de monoxyde de carbone (Galada *et al.*, 2009 ; Schwartz *et al.*, 2010), et sur l'intention d'utiliser une alarme CO (Galada *et al.*, 2009).

Aucune étude ne va suffisamment loin pour faire état d'effets sur les comportements de prévention. Par ailleurs, on peut s'interroger sur le caractère coût efficace de la mise en place d'ateliers d'information destinés à des petits groupes de personnes, comme le décrivent Schwartz *et al.*, (2010). En France, 77 % de la population possède au moins un appareil susceptible d'émettre du monoxyde de carbone, et se trouve donc confrontée à ce risque (Ménard *et al.*, 2008). Il serait complexe et coûteux d'organiser des ateliers d'information de trente minutes auprès des trois quarts des foyers français. L'expérience pourrait cependant être tentée auprès de certaines sous-populations identifiées comme prioritaires ou plus à risque, ou dans les régions les plus concernées par ce risque.

Il est important de rappeler que le fait de ne

pas pouvoir identifier d'interventions validées *via* l'examen de la littérature scientifique ne signifie pas qu'il n'existe pas d'interventions efficaces. Ainsi, pour la prévention des intoxications CO comme sur d'autres sujets en promotion de la santé, on peut faire l'hypothèse qu'une communication répétée et fondée sur les théories de changements de comportements de santé, complétée par des interventions de proximité, est utile et efficace. Ces hypothèses mériteraient cependant d'être confirmées par des études empiriques ou observationnelles.

En termes de recommandations, les conclusions des experts confortent les actions déjà mises en œuvre en France depuis plusieurs années. Il s'agit d'inciter les acteurs de la prévention à informer la population sur les risques liés au monoxyde de carbone et à diffuser les conseils de prévention associés : vérification annuelle des appareils susceptibles d'émettre du monoxyde de carbone, aération, respect des conditions d'utilisation des appareils à combustion, repérage des symptômes d'intoxication, équipement en détecteurs de CO. Certains documents d'information grand public comportent des conseils complémentaires à ceux que diffusent les autorités sanitaires françaises, montrant ainsi la diversité des gestes de prévention.

Mais la véritable divergence stratégique entre les autorités sanitaires anglo-saxonnes et les autorités françaises porte sur l'équipement des foyers en détecteurs de CO. Dans des pays anglo-saxons, l'équipement en détecteurs CO figure parmi les recommandations officielles (Centers for Disease Control and Prevention,

2005 ; Gouvernement du Canada, 2012 ; National Health Service (NHS), 2012). En France, le ministère chargé de la Santé demeure réservé sur cette mesure (ministère des Affaires sociales et de la Santé, 2012). Des interrogations demeurent en effet sur l'intérêt des détecteurs CO dans les logements : fiabilité des appareils, conditions d'installation, conséquences sur l'entretien des appareils à combustion (Guillois-Bécel *et al.*, 2009, 2010). Notons tout de même que parmi les articles anglo-saxons identifiés dans le cadre de notre recherche, le plus récent se distingue des précédents, puisqu'il souligne le manque de fiabilité des détecteurs CO, et la nécessité de renforcer les contrôles sur ces appareils avant leur vente au public (Ryan and Arnold, 2011). La publication de cette étude marque peut-être un pas vers une démarche d'amélioration de la qualité et de la fiabilité des détecteurs aux États-Unis, démarche souhaitée depuis plusieurs années par les autorités françaises.

Pour l'avenir, la stratégie adoptée par les autorités sanitaires françaises consiste à donner aux Agences Régionales de Santé (ARS) les moyens d'adapter l'intensité de la communication à leur contexte régional au début de chaque saison de chauffe ; un élément certainement important dans un contexte national où trois régions (Île-de-France, Rhône-Alpes, Nord-Pas-de-Calais) concentrent plus de 40 % des cas d'intoxication (Institut de Veille Sanitaire, 2013). Elle devrait être complétée par un travail d'adaptation des outils de communication aux populations cibles. Enfin, à ces actions devraient être adossées des évaluations rigoureuses permettant de mesurer l'efficacité de ces actions au niveau local.

1. En 2006, 83 % de la population avait déjà entendu parler du monoxyde de carbone ; en 2009, c'était le cas de 96 % du public (Girard Delphine. Post test mené auprès de 2013 personnes (données non publiées)).
2. Fin 2009, même après 3 vagues de diffusion des spots radio entre octobre et décembre de la même année, 28 % de la population pense qu'utiliser un chauffage d'appoint au bois, au charbon, au gaz ou au pétrole pendant 24 h de manière continue ne présente aucun risque pour la santé ; 21 % de la population pensent qu'on n'a pas besoin d'avoir recours à un professionnel pour vérifier le bon fonctionnement des appareils de chauffage en début d'hiver.

Références

- Centers For Disease Control And Prevention. (2005). Prevention guidelines. You can prevent Carbon monoxide exposure. [En ligne] : <http://www.cdc.gov/co/pdfs/guidelines.pdf> [dernière consultation en janvier 2014].
- Clifton J.C. 2nd, Leikin J.B., Hryhorczuk D.O., Krenzelok E.P. (2001). Surveillance for carbon monoxide poisoning using a national media clipping service. *The American journal of emergency medicine*, n° 19, p. 106-108.
- Department Of Health. (2008). Carbon monoxide: are you at risk ? [En ligne] : http://www.co-bealarmed.co.uk/wp-content/uploads/2012/10/Carbon_Monoxide_Are_You_at_risk_NHS-leaflet.pdf [dernière consultation en janvier 2014].
- Galada H.C., Gurian P.L., Corella-barud V. *et al.* (2009). Applying the mental models framework to carbon monoxide risk in northern Mexico. *Revista panamericana de salud publica = Pan American Journal of Public Health*, n° 25, p. 242-253.
- Gouvernement du Canada. (2012). Prévenez les infiltrations de monoxyde de carbone dans votre maison. [En ligne] : <http://www.canadiensensante.gc.ca/environnement-environnement/home-maison/monoxyde-monoxyde-fra.php> [dernière consultation en janvier 2014].
- Guillois-Bécel Y., Tron I., Le Strat Y. *et al.* (2009). *Intérêt des détecteurs CO pour l'alerte et la prévention des intoxications oxycarbonées dans l'habitat. Analyse de la démarche de l'office HLM Bretagne-Sud Habitat (Morbihan)*. Saint-Maurice : Institut de Veille Sanitaire.
- Guillois-Bécel Y., Tron I., Le Strat Y., *et al.* (2010). Connaissance des risques associés au monoxyde de carbone dans un parc HLM partiellement équipé de détecteurs de monoxyde de carbone, 2007, Morbihan, France. *Bulletin épidémiologique hebdomadaire*, 7 septembre 2010, n° 33, p. 356-359.
- INPES. Le monoxyde de carbone. (2010). [En ligne] : <http://www.inpes.sante.fr/CFESBases/catalogue/pdf/1243.pdf> [dernière consultation en janvier 2014].
- Institut de Veille Sanitaire. (2013). Bulletin de surveillance des intoxications au monoxyde de carbone (CO). Synthèse de la période de chauffe 2012-2013. [En ligne] : <http://www.invs.sante.fr/Dossiers-thematiques/Environnement-et-sante/Intoxications-au-monoxyde-de-carbone/Bulletin-de-surveillance-des-intoxications-au-CO/2012-2013/Surveillance-des-intoxications-au-monoxyde-de-carbone.-Synthese-de-la-periode-de-chauffe-2012-2013> [dernière consultation janvier 2014].
- Institut National de Santé Publique du Québec. (2010). Efficacité communicationnelle. L'évaluation de trois outils de communication grand public sur le monoxyde de carbone. [En ligne] : http://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/1076_EfficaciteCommEvalOutilCommCo2.pdf [dernière consultation janvier 2014].
- Lin G., Conners G.P. (2005). Does public education reduce ice storm-related carbon monoxide exposure? *The Journal of Emergency Medicine*, n° 29, p. 417-420.
- Mandal S., Ruggles R., Leonardi G. *et al.* (2011). Developing best practice response to carbon monoxide incidents: a toolkit for health protection frontline staff. *Public Health*, n° 125, p. 148-156.
- Ménard C., Girard D., Léon C., Beck F. (2008). *Baromètre santé environnement 2007*, Saint-Denis, INPES.
- Ministère chargé de la Santé et des Services sociaux du Québec. (2005). Le monoxyde de carbone tue. Y en a-t-il chez vous ? [En ligne] : <http://msssa4.msss.gouv.qc.ca/fr/document/publication.nsf/4b1768b3f849519c852568fd0061480d/2725e7c9da1dc429852576270063889a?OpenDocument> [dernière consultation janvier 2014].
- Ministère des Affaires sociales et de la Santé. (2012). Monoxyde de carbone, prévention des intoxications. [En ligne] : <http://www.sante.gouv.fr/prevention-des-intoxications.html> [dernière consultation en janvier 2014].
- Morgan M.G., Fischhoff B., Bostrom A., Atman C.J. (2002). *Risk communication: a mental models approach*, New York, Cambridge University Press.
- National Health Service (NHS). (2012). Preventing carbon monoxide poisoning. [En ligne] : <http://www.nhs.uk/Conditions/Carbon-monoxide-poisoning/Pages/Prevention.aspx> [dernière consultation en janvier 2014].
- Raub J.A., Mathieu-Nolf M., Hampson N.B., Thom S. R. (2000). Carbon monoxide poisoning – a public health perspective. *Toxicology*, n° 145, p. 1-14.
- Ryan T.J., Arnold K.J. (2011). Residential carbon monoxide detector failure rates in the United States. *American Journal of Public Health*, n° 101, p. e15-17.
- Schwartz L., Martinez L., Louie J., *et al.* (2010). An evaluation of a carbon monoxide poisoning education program. *Health Promotion Practice*, n° 11, p. 320-324.
- WHO. (2010). WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. [En ligne] : <http://www.who.int/indoorair/publications/9789289002134/en/> [dernière consultation janvier 2014].
- Yoon S.S., MacDonald S.C., Parrish R.G. (1998). Deaths from unintentional carbon monoxide poisoning and potential for prevention with carbon monoxide detectors. *JAMA : the journal of the American Medical Association*, n° 279, p. 685-687.

Consultez la revue en ligne : irevues.inist.fr/pollution-atmospherique/

I-Revues | Accès rapide aux publications | Contact | Lara | INIST | CNRS

POLLUTION , ATMOSPHERIQUE

Climat, Santé, Société



accueil >

Pollution atmosphérique

Depuis 1958, la revue « Pollution atmosphérique, climat, santé, société » a contribué à l'élargissement des connaissances scientifiques sur la qualité de l'air, ses conséquences sur le changement climatique, ses effets sur la santé et sa prise en compte par la société. Numérisée depuis 1992, plus de 1000 articles sont ainsi disponibles en ligne...

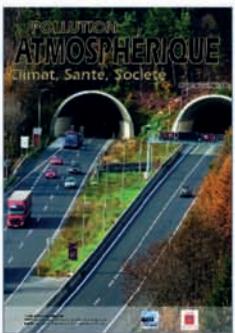
La revue, classée de rang A par l'AERES, est dotée d'un [Comité de rédaction](#) et d'un [Conseil scientifique](#).

Les articles sont publiés en français ou en anglais avec un résumé, des mots-clés et les légendes des figures disponibles dans les deux langues.

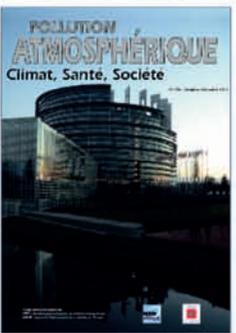
Since 1958, the « Pollution atmosphérique, climat, santé, société » journal has been active in the circulation of scientific knowledge concerning air quality, its consequences on climate change, its impacts on health and a growing social awareness. Digitized since 1992, more than 1.000 articles are available on-line... The journal, ranked A by the AERES (Agence d'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur), has an [editorial board](#) and a [scientific committee](#). Articles are published in English or French. Summaries, key words and illustrations captions are available in both languages.

Derniers numéros en ligne

N° 221 Janvier-mars 2014



N° 220 Octobre-décembre 2013



Avec le soutien de



Recherche

Votre recherche
Rechercher avancée

Index

Index auteurs
Index de mots-clés
Index by keyword

Numéros spéciaux

Consulter les numéros spéciaux

Numéros en ligne

2014


2013


2012


2011


2010


Consulter tous les numéros

Informations sur la revue

Comités
Recommandations aux auteurs
Contact

Suivez la vie du site

Fil RSS

Issn électronique 2268-3798
Plan du site | Mentions légales | Édité par Lodet | Accès réservé

UNIVERSITÉ D'ÉTÉ ÉNERGIE-SANTÉ

Énergie et santé : trois études au banc d'essai

Energy and health: three studies on test bench

André AURENGO¹

Résumé

Après quelques rappels en épidémiologie, notamment sur les études cas témoins, la régression logistique, les incertitudes sur les expositions, la multiplicité des tests statistiques, la pratique de sous-groupes des populations étudiées, les biais d'anamnèse et la difficulté à mettre en évidence de très faibles risques, nous examinons trois études visant à mettre en évidence des faibles risques. Ces études portent sur le risque de leucémie ou de tumeur cérébrale après scanner cérébral dans l'enfance, et sur l'impact des centrales nucléaires et des lignes à très haute tension sur l'incidence des leucémies de l'enfant. Ces exemples montrent les faiblesses des études de cas témoins qui nécessitent une estimation rétrospective de l'exposition et des facteurs de confusion, l'intérêt des études de cohortes et l'inutilité de certaines études qui, compte tenu des études antérieures, n'ont pas la puissance suffisante pour répondre aux questions posées.

Mots-clés

Épidémiologie, faibles doses, rayonnements ionisants, rayonnements non ionisants, tumeur cérébrale, leucémie de l'enfant.

Abstract

After some reminders in epidemiology, including case-control studies, logistic regression, exposure uncertainties, multiple statistical tests, splitting study populations in subgroups, memory biases and difficulty to identify very low risk, we examine three studies pertaining to low risk. These studies focus on the risk of leukemia or brain tumor after brain scan in childhood and on the impact of nuclear power plants and high-voltage lines on the incidence of childhood leukemia. These examples show the weaknesses of case-control studies that require retrospective estimates of exposure and confounding factors, the interest of cohort studies and the uselessness of some studies which, taking into account previous studies, are underpowered to answer questions.

Keywords

Epidemiology, low doses, ionizing radiations, non ionizing radiations, brain tumor, child leukemia.

Bien que les impacts sanitaires des différentes sources d'énergie soient souvent mis en avant et largement médiatisés (de manière plus ou moins objective et sélective), ils ont été peu évoqués lors du récent débat national sur la transition énergétique.

C'est pourtant le retentissement dans les medias des rapports, études scientifiques et allégations qui forgent l'opinion des citoyens sur les choix qui pourraient être faits entre les différentes sources d'énergie. C'est pourquoi il nous a paru important de montrer comment cette opinion évolue, et quel crédit on peut apporter à certaines évaluations des risques dans ce domaine.

Opinions

Le « baromètre » que l'IRSN², publié chaque année, donne l'état de l'opinion et son évolution à travers des sondages sur les différentes sources d'énergie, sur les risques en général et sur la confiance que les Français accordent à tel ou tel organisme ou groupe social.

Plusieurs faits émergent :

- une relative stabilité de l'opinion sur les centrales nucléaires, avec des « pics de défiance » transitoires. Les risques qu'elles représentent sont, en moyenne et en 2012, jugés comme élevés pour environ 45 % des personnes interrogées, avec un pic transitoire à 55 % en 2011 après l'accident de Fukushima ;
- une évolution paradoxalement parallèle de l'opinion sur les risques des déchets nucléaires qui sont jugés élevés à 62 % en « post-Fukushima » et retombent à leur niveau habituel d'environ 55 % deux ans plus tard. Il peut paraître étonnant que les risques des déchets nucléaires soient toujours perçus comme plus élevés que ceux des centrales, mais cette bizarrerie persiste depuis 15 ans ;
- une grande défiance vis-à-vis des sources d'information. Si l'Académie des sciences (56 % des personnes interrogées lui font confiance) et le CEA³ (50 %) sont jugés un peu plus fiables que trompeurs, en revanche, EDF⁴ (38 %), les élus locaux (27 %) et le gouvernement (18 %) sont majoritairement perçus comme ne disant pas la vérité sur le nucléaire.

À la lumière de ces données, il est intéressant d'examiner l'impact médiatique et la crédibilité de trois études récentes sur les risques des faibles doses de rayonnements ionisants, l'impact des

centrales nucléaires et des lignes à très haute tension sur l'incidence des leucémies de l'enfant, sujet porteur d'un impact émotionnel majeur. L'analyse technique de ces études conduit tout d'abord à quelques rappels en épidémiologie.

Précarité épidémiologique

L'épidémiologie joue un rôle irremplaçable dans la prise de décision en santé publique et en médecine clinique en fournissant des données sur l'état sanitaire, en concourant à l'analyse de risques et à l'évaluation des pratiques et de la politique de santé. Mais elle rencontre des difficultés à répondre clairement sur le niveau, voire la réalité, des risques liés à de faibles expositions, en particulier environnementales, et on relève dans ce domaine un grand nombre d'études contradictoires et de « faux positifs ».

Parmi les causes de ces discordances, on relève fréquemment l'absence de prise en compte des incertitudes sur les expositions aux facteurs de risques suspectés ou à leurs facteurs de confusion, la multiplication sans précautions des tests statistiques et la présence de biais incontrôlables.

Incertitudes sur l'exposition

La majorité des études épidémiologiques environnementales sont de type cas-témoins, ce qui permet dans un délai assez bref d'étudier des faibles risques soupçonnés d'entraîner des pathologies peu fréquentes. Leur principe est simple ; nous le décrivons en prenant l'exemple d'une étude sur la responsabilité d'une exposition à de faibles doses de rayonnements ionisants sur la survenue de leucémies de l'enfant :

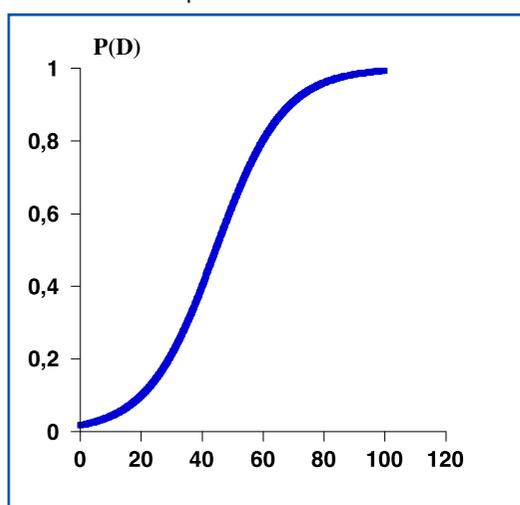
- un certain nombre de cas (N) d'enfants atteints de leucémie sont recueillis. À chaque cas, on associe un ou plusieurs « témoin(s) », enfant de même âge, même sexe, même contexte socio-professionnel parental ;
- on estime ensuite la dose efficace de rayonnements ionisants reçue par les cas et les témoins. Cette estimation est nécessairement rétrospective. Elle repose, quand c'est possible, sur des données objectives (par exemple des mesures, des données médicales), sinon les auteurs ont recours à des données subjectives, par exemple fondées sur l'interrogatoire, ou encore à un « indicateur de l'exposition », donnée censée refléter l'exposition. L'exposition est ainsi estimée avec

un éventuel biais (ce cas est examiné plus loin) et, dans tous les cas, avec un certain degré d'incertitude ;

- on compare ensuite les doses chez les cas et les témoins. Cette comparaison utilise souvent un modèle de la probabilité P du risque de leucémie en fonction de la dose D de type « logistique », faisant appel à deux paramètres que nous noterons a et b :

$$P(D) = \frac{e^{a+bD}}{1 + e^{a+bD}}$$

La courbe correspondante a la forme suivante :



Que la relation dose-risque ait cette forme est une hypothèse très forte (à l'évidence fautive dans notre exemple) qui n'est pratiquement jamais validée ; en exprimant la probabilité d'avoir observé les cas et les témoins ayant reçu les doses estimées pour chacun, on peut calculer la probabilité globale des données, en déduire les valeurs de a et b qui rendent cette probabilité maximale, et enfin calculer l'*odds ratio*⁵ (OR) et son intervalle de confiance à 95 %⁶, noté IC95. On considère qu'il y a un lien entre la dose et la pathologie explorée si la borne inférieure de l'intervalle de confiance dépasse 1.

Ce n'est pas l'incertitude sur la dose, inhérente aux sciences d'observation, qui pose problème mais :

- le fait qu'elle n'est pratiquement jamais prise en compte dans l'analyse statistique, alors que des techniques existent pour le faire ;
- dans le cas où un indicateur de l'exposition est utilisé, si l'étude montre une association entre l'indicateur et la pathologie étudiée, que l'on en déduise sans précaution qu'il y a un lien entre le

facteur de risque lui-même et cette pathologie. En effet, une telle conclusion nécessite de tenir compte de la loi de probabilité qui lie l'indicateur au facteur de risque, ce qui n'est pratiquement jamais fait.

L'influence des incertitudes sur les expositions a fait l'objet de nombreux travaux qui montrent que ces deux erreurs ont pour effet une estimation erronée du risque relatif (RR), dans un sens ou dans l'autre, et, en général, une sous-estimation de son intervalle de confiance.

Quand l'intervalle de confiance du risque relatif est juste au-dessus de 1, (par exemple RR=1,62 ; IC95 : [1,05—2,50]) l'étude est considérée comme « positive », mais elle ne l'est pas toujours en réalité comme on le montrerait en prenant correctement en compte l'incertitude sur l'exposition. Ce type de « faux positif méthodologique » explique un grand nombre d'incohérences entre études épidémiologiques.

Sur la fiabilité des indicateurs de l'exposition, on peut citer, par exemple, le nombre de moutons du troupeau d'un éleveur comme indicateur de l'exposition aux insecticides⁷ (ce qui ne prend en compte ni la fréquence et les techniques d'application des insecticides, ni les autres facteurs de risque, en particulier viraux, liés aux moutons). Un autre exemple est l'inverse de la distance aux lignes à très haute tension de la maison où est né un enfant comme indicateur de son exposition aux champs électromagnétiques⁸. Dans ce dernier exemple, on a montré que cet indicateur avait une très basse valeur prédictive⁹. Le choix de cet indicateur est d'autant plus paradoxal que cette étude de 2005 ramène à des méthodes d'estimation qui avaient cours dans les années 70, alors que l'on dispose maintenant de systèmes de mesure individuels de l'exposition à ces champs, sur une période significative.

Sous-groupes

La multiplicité des tests statistiques dans une même étude, et en particulier le test d'une hypothèse sur un nombre important de sous-groupes de la population étudiée, peut conduire, par hasard, à des tests positifs, sources d'incohérences entre les études. La réponse habituelle à cette difficulté est de ne considérer comme avérés que des risques retrouvés par plusieurs études indépendantes. Cette attitude de prudence se heurte au fait qu'un risque non confirmé mais fortement médiatisé est considéré comme définitivement démontré par le public et les médecins

non spécialistes du domaine. Des techniques de mise en œuvre des tests multiples, comme celle de Holm-Bonferroni¹⁰, évitent de telles conclusions erronées ; elles ne sont malheureusement presque jamais utilisées.

Un exemple est une étude cas-témoins du lien entre vaccination contre l'hépatite B¹¹ qui concluait au risque de sclérose en plaques (SEP) après cette vaccination, dans le sous-groupe des cas qui font régulièrement les vaccins conseillés, pour lesquels le délai vaccin-SEP était supérieur à 3 ans et qui ont utilisé un certain type de vaccin. Le risque relatif était RR # 1,7 ; IC95 : [1,03—2,95]. Dans ce cas, l'IC est très proche de 1, mais il n'y a guère d'incertitude sur l'exposition (le fait d'avoir été vacciné). En revanche, compte tenu de la multiplicité des sous-groupes, les auteurs ont effectué plus de 150 tests statistiques ; la probabilité d'en obtenir un positif par simple hasard dépasse 90 %.

Biais d'anamnèse

Les difficultés exposées ci-dessus peuvent être corrigées ou prévenues. Il n'en est pas ainsi des biais d'anamnèse qui peuvent affecter les études cas-témoins dont l'évaluation rétrospective de l'exposition aux facteurs de risque repose sur un interrogatoire. Selon les cas, l'exposition peut être alors surestimée (c'est souvent le cas des expositions involontaires), ce qui peut conduire à des études faussement positives, ou sous-estimée (cas fréquent des expositions volontaires) avec le risque de faux négatifs.

Un exemple est donné par l'étude internationale Interphone sur les risques du téléphone portable pour l'induction de tumeurs de la tête. On savait dès sa mise en œuvre que les risques des portables, s'ils existaient, étaient très faibles puisque les études antérieures avaient été pratiquement toutes négatives et que, malgré plus d'un milliard d'utilisateurs dans le monde (plus de 4 milliards aujourd'hui) aucune pathologie n'avait significativement émergé. On avait donc besoin d'une estimation précise de l'exposition des cas et des témoins, ici le nombre et la durée des appels.

Mais dès 2001, il était acquis que l'interrogatoire des utilisateurs sur leur consommation téléphonique, utilisé pour Interphone, n'est fiable ni pour la durée, ni pour le nombre des appels. En effet, selon les auteurs mêmes d'Interphone :

« L'analyse de la concordance entre les données estimées en 2001 par les sujets et celles mesurées par les opérateurs montre une concordance assez médiocre ($j = 0,34$) mais significative ($p < 0,01$) pour les nombres moyens d'appels. En revanche, il n'y a aucune concordance entre les durées réelles et les durées estimées au cours du premier entretien ($j = 0,18$). (...) la corrélation entre les nombres [d'appels] estimés et mesurés, et plus encore celle des durées, est très mauvaise¹² ». Encore cet interrogatoire a-t-il été conduit en juin 2001 sur les appels d'octobre 2000 à mars 2001 ; qu'en est-il pour les appels datant de plusieurs années utilisés dans Interphone ?

On peut donc se poser la question de la positivité réelle de quelques résultats « positifs » rapportés par certaines études nationales faisant partie d'Interphone. Par exemple, l'étude française¹³ rapporte un risque de gliome au-delà de 340 heures d'utilisation du portable avec RR # 1,02 ; IC 95% = [1,00—1,04]. Symétriquement et pour les mêmes raisons, on peut s'interroger sur la réalité de la diminution de 25 % du risque de méningiome qu'assurerait l'utilisation du portable d'après les résultats d'Interphone obtenus pour cinq pays nord-européens¹⁴ avec RR # 0,76 ; IC95 : [0,65—0,89].

On peut citer plusieurs exemples : faibles doses d'alcool, consommation alimentaire au moment des retombées de Tchernobyl ou des essais nucléaires, téléphones portables, pesticides. Ces biais sont généralement impossibles à prendre en compte, faute d'une technique objective permettant de les quantifier. Les conclusions de l'étude sont alors invalidées, *a fortiori* quand les risques mis en évidence sont faiblement significatifs.

On connaît dans ce cadre la supériorité des études de cohortes pour lesquelles les futurs cas ne sont pas influencés par une pathologie à venir, et pour lesquelles une quantification objective, en temps réel, des expositions est souvent possible.

La surinterprétation des études

La surinterprétation des études ne se limite pas à un phénomène d'exploitation de résultats dans un but de sensationnalisme médiatique ou d'activisme militant. Elle peut conduire à consi-

dérer comme probables, voire avérées ou même causales, des associations dont la vraisemblance biologique est quasi nulle. Comme le remarque Valleron¹⁵, « *l'analyse statistique des résultats implique qu'explicitement ou implicitement on tienne compte des connaissances a priori relatives aux hypothèses testées, ce qui est contre le sentiment commun, mais naïf, selon lequel la subjectivité n'a pas sa place en science* ». Cette prise en compte des connaissances *a priori* n'est pas toujours utilisée pour tempérer des résultats qui ne devraient être admis qu'avec un niveau de preuve incontestable compte tenu de leur faible vraisemblance^{16,17}.

Appliquons ces rappels à des études récentes dans le domaine des faibles doses et de l'impact d'installations de production ou de transport de l'énergie électrique.

Étude sur les faibles doses : scanner cérébral de l'enfant¹⁸

Cette étude rétrospective, conduite au Royaume-Uni, a porté sur 74 cas de leucémies et 135 tumeurs cérébrales et a exploré l'éventuelle responsabilité de scanners effectués respectivement 2 et 5 ans au moins avant la découverte de la maladie.

L'étude trouve :

- un risque relatif (RR) de leucémie égal à 1,036 par mGy à la moelle osseuse, IC95 : [1,01—1,12] ; RR est de 2,18 ; IC95 : [1,46 — 6,94] pour une dose cumulée atteignant 30 mGy ;
- un risque relatif de tumeur cérébrale égal à 1,023 par mGy au cerveau, IC95 : [1,01—1,049] ; RR est de 2,82 ; IC95 : [1,33 — 6,03] pour une dose cumulée atteignant 50 mGy.

Cette étude présente des faiblesses et des biais possibles qui limitent fortement sa signification, comme le montre bien une analyse de l'IRSN¹⁹. Les deux principales failles sont l'absence de données quant aux raisons qui ont conduit à faire un ou plusieurs scanners (qui n'est pas un examen courant chez l'enfant) et l'estimation de la dose à l'organe intéressé (moelle osseuse ou cerveau) qui ne repose pas sur des données individuelles mais sur des abaques construits à partir de données d'examens par scanographie réalisés après 2001, donc après un grand nombre des scanners impliqués dans cette

étude.

Les doses peuvent varier dans des proportions importantes selon le type de scanner, le protocole utilisé et la morphologie de l'enfant. Il en résulte une incertitude importante sur la dose, non prise en compte dans l'analyse statistique, ce qui limite la crédibilité des résultats de cette étude.

Le premier auteur, Mark Pearce, a précisé que le risque est faible car il s'agit de cancers relativement rares : « *En fait, pour 10 000 scanners réalisés avant l'âge de 10 ans, on risque de voir se développer un cas de leucémie et un cas de tumeur cérébrale dus aux rayonnements dans la décennie suivante* ». Ces propos rassurants n'ont guère été repris dans les médias...

Étude sur les leucémies aiguës de l'enfant à proximité des centrales nucléaires²⁰

Cette étude française cas-témoins sur le risque de leucémie aiguë de l'enfant a analysé le lien éventuel entre des « indicateurs » relatifs aux centrales nucléaires (CNPE) et la survenue de leucémies de l'enfant. Elle a été conduite sur la période 2002-2007 et porte sur 2 753 cas et 30 000 témoins. Elle complète une première phase²¹ conduite de manière analogue sur la période 1990-2001.

Les indicateurs étaient de deux types :

- la distance du logement de l'enfant au CNPE le plus proche, laquelle, bien que ce ne soit pas dit explicitement dans l'étude, ne peut être un indicateur que de la dose de rayonnement ionisant. Cette distance était estimée par le système GéoCap qui donne les coordonnées des habitations connaissant leur adresse (géolocalisation) ;
- la dose de rayonnement ionisant reçue au domicile de l'enfant, calculée par l'IRSN en tenant compte de paramètres importants comme la direction des vents dominants, la pluviométrie, le type de CNPE et la composition isotopique des rejets gazeux²².

Ces études trouvent :

- pour la période 1990-2001, aucun risque significatif (premier indicateur) ;
- pour la période 2002-2007, un risque relatif de leucémie à une distance inférieure à 5 km d'un

CNPE (premier indicateur) $RR = 1,9$; $IC95 : [1,00—3,30]$; aucun risque significatif en considérant le second indicateur (dose calculée par l'IRSN) ;

- pour la période 1990-2007, aucun risque significatif (premier indicateur).

Cette étude appelle tout d'abord des remarques méthodologiques, notamment sur l'incertitude de la géolocalisation par GéoCap, qui est comprise entre 20 et 1 000 m. Cette incertitude n'a pas été prise en compte dans l'analyse statistique. En tant qu'indicateur de la dose, la géolocalisation est beaucoup moins précise que les estimations dosimétriques de l'IRSN.

On peut ensuite s'interroger sur la notion de « dose » utilisée ici qui ne tient pas compte de la durée de l'exposition : les cas ou les témoins ont pu s'installer des années plus tôt dans le logement pris en compte dans l'étude ou, au contraire, n'y vivre que depuis quelques jours. Ce n'est pas une dose qui est réellement prise en compte, mais un débit de dose.

Poursuivre sur 2002-2007 une étude conduite sur 1990-2001 a l'intérêt de disposer de davantage de cas et donc d'avoir une plus grande puissance statistique. La fusion des données n'est possible que si aucun élément n'est survenu qui aurait pu différencier les deux périodes, ce qui est bien le cas.

Il est donc paradoxal d'avoir surtout insisté sur le résultat de 2002-2007 obtenu par une géolocalisation incertaine alors que les auteurs disposaient 1) des conclusions négatives sur 2002-2007 obtenues grâce aux estimations dosimétriques de l'IRSN et 2) des conclusions négatives obtenues par géolocalisation sur la période 1990-2007 qui avaient une puissance statistique supérieure à son sous-groupe 2002-2007.

Étude sur les leucémies aiguës de l'enfant à proximité des lignes à haute tension²³

Cette étude française cas-témoins sur le risque de leucémie aiguë de l'enfant a analysé le lien éventuel entre la distance à une ligne à haute tension et la résidence de l'enfant et la survenue d'une leucémie. Elle a été conduite sur 2 279 cas

de leucémie aiguë de l'enfant et 30 000 témoins.

En se limitant à une distance inférieure à 50 m de la ligne la plus proche, le géocodage « GéoCap » a permis de retenir 9 cas et 60 témoins. Le risque relatif n'était pas significatif : $OR=1,7$; $IC95 : [0,90—3,61]$.

Compte tenu des incertitudes de la géolocalisation, les auteurs ont vérifié les coordonnées des résidences et n'ont plus trouvé que 5 cas et 35 témoins. Après cette correction des coordonnées, le risque n'était pas significatif : $OR=1,4$; $IC95 : [0,5—3,51]$.

Comme la précédente, cette étude est limitée par la précision de la géolocalisation. Une incertitude comprise entre 20 et 1 000 m correspond à une incertitude considérable sur le champ magnétique créé par la ligne la plus proche (la localisation des lignes, fondée sur les données de RTE²⁴, était beaucoup plus précise).

Comme la précédente, cette étude n'utilise pas une « dose » de rayonnement non ionisant, mais un débit de dose, car l'étude ne tient pas compte de la durée de l'exposition, c'est-à-dire du temps pendant lequel un cas ou un témoin a résidé dans la maison retenue dans l'étude. L'étude ne tient pas compte de la charge de la ligne, ni d'autres sources d'exposition, et elle n'a été validée par aucune mesure du champ électromagnétique.

Estimer l'exposition aux champs électromagnétiques par géolocalisation est une régression importante par rapport aux techniques de plus en plus précises utilisées dans ce contexte : proximité des ouvrages électriques dans les années 1970, puis mesures dans la chambre des enfants et à l'école, puis port d'un dosimètre enregistrant le champ en temps réel pendant plusieurs jours. La géolocalisation ramène l'estimation de ces expositions 40 ans en arrière.

Ces faiblesses de l'étude ont été transmises à l'éditeur du *British Journal of Cancer* qui les a publiées²⁵.

Enfin, on peut s'étonner que, compte tenu des intervalles de confiance des OR qui montrent l'absence de risque statistiquement significatif, les auteurs écrivent : « *Increased odds ratios (ORs) were observed for AL occurrence and living within 50 m of a VHV-HVOL (OR=1.7 [0.9—3.6])* ».

Conclusion

Chaque année, sont publiées des milliers d'études sur les faibles risques. Ces études sont difficiles, sujettes à de nombreux pièges épidémiologiques susceptibles d'invalider leurs conclusions.

Les études cas-témoins sont particulièrement fragiles en raison de la nécessité d'une évaluation rétrospective des expositions au facteur de risque étudié et aux autres éventuels facteurs de risque.

Les études « de cohorte » n'ont pas ce problème car, fondées sur la surveillance régulière d'une population définie et constituée avant l'apparition de la maladie étudiée, elles peuvent recueillir les données d'exposition au fur et à mesure, sans biais d'anamnèse. Mais elles rencontrent les mêmes difficultés que les études cas-témoins pour quantifier les expositions antérieures à la constitution de la cohorte. Leur principal inconvénient est logistique, car l'étude de maladies rares nécessite de suivre des effectifs parfois considérables (plusieurs centaines de milliers de personnes) pendant des années.

Il n'est donc pas étonnant de rencontrer des études contradictoires, certaines montrant un risque, d'autres ne le montrant pas, pour les mêmes pathologie et facteur de risque.

Mais les contradictions viennent moins des incertitudes que de leur non-prise en compte dans les analyses statistiques, et les données de base de ces études, en général financées par la collectivité, devraient être accessibles aux chercheurs après un délai raisonnable afin de pouvoir reprendre l'analyse statistique si nécessaire.

Certaines études n'ont manifestement pas la puissance suffisante pour mettre en évidence un risque non établi mais dont des études antérieures ont montré que s'il existe, il est très faible. Si le risque est réel, cette sous-estimation de l'effectif nécessaire conduit le plus souvent à un faux négatif. Inversement, dans le cas contraire, elles conduisent souvent à des faux positifs, car ce sont les études les plus sensibles aux facteurs de confusion et aux biais divers, et elles alimentent ainsi des polémiques infondées.

Il s'agit souvent d'études de circonstance, sans visée scientifique solidement établie, et entreprises surtout pour « rassurer » les populations proches d'une installation polluante. Dans de nombreux cas, une analyse préalable de la faisabilité peut montrer que l'étude n'a aucune chance de mettre en évidence un risque, même s'il existe réellement, et inversement, que si elle met en évidence un risque significatif, ce résultat sera plus vraisemblablement dû au hasard qu'à la réalité. Entreprendre l'étude malgré ce constat pose un problème d'éthique scientifique.

1. Biophysicien, chef du service de médecine nucléaire de la Pitié-Salpêtrière, membre de l'Académie de médecine.

2. Institut de Radioprotection et Sûreté Nucléaire.

3. Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives.

4. Électricité de France.

5. L'*odds ratio*, ou « rapport des cotes » est le rapport de la cote d'un événement arrivant à un groupe A d'individus à celle du même événement arrivant à un groupe B d'individus. Si la probabilité qu'un événement arrive dans le groupe A est p , et q dans le groupe B, le rapport des cotes est : $\frac{p/(1-p)}{q/(1-q)}$ l'*odds ratio* est pratiquement égal au risque relatif si le risque est faible.

6. C'est-à-dire l'intervalle des valeurs dans lequel il a 95 % de chances de se trouver.

7. Rafnsson V. (2006). Risk of non-Hodgkin's lymphoma and exposure to hexachlorocyclohexane, a nested case-control study. *Eur J Cancer*, n° 42, p. 2781-2785.

8. Draper G, Vincent T, Kroll ME, Swanson J. (2005). Childhood cancer in relation to distance from high voltage power lines in England and Wales: a case-control study. *BMJ*, n° 330, p. 1279-1280.

9. Maslanyj M, Simpson J, Roman E, Schüz J. (2009). Power frequency magnetic fields and risk of childhood leukaemia: misclassification of exposure from the use of the 'distance from power line' exposure surrogate. *Bioelectromagnetics*, n° 30, p. 183-188.

10. Holm S. (1979). A simple sequentially rejective multiple test procedure. *Scandinavian Journal of Statistics*, n° 6, p. 65-70.
11. Mikaeloff Y, Caridade G, Suissa S *et al.* (2009). Hepatitis B vaccine and the risk of CNS inflammatory demyelination in childhood. *Neurology*, n° 72, p. 870-871.
12. Hours M, Montestrucq L, Arslan M *et al.* (2007). Validation des outils utilisés pour la mesure de la consommation téléphonique mobile dans l'étude Interphone en France. *Environnement, Risques & Santé*, n° 6, p. 101-109.
13. Hours M, Bernard M, Montestrucq L *et al.* (2007). Téléphone mobile, risque de tumeurs cérébrales et du nerf vestibuloacoustique : l'étude cas témoins Interphone en France. *Revue d'Épidémiologie et de Santé Publique*, n° 55, p. 321-332.
14. Lahkola A, Salminen T, Raitanen J *et al.* (2008). Meningioma and mobile phone use--a collaborative casecontrol study in five North European countries. *Int J Epidemiol*, n° 37, p. 1304-13.
15. Valleron AJ. (2000). Mise en évidence des faits et recherche des causes en épidémiologie environnementale : enjeux méthodologiques. *C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la vie*, n° 323, p. 617-628.
16. Harris WS, Gowda M, Kolb JW. (2000). A randomized, controlled trial of the effects of remote, intercessory prayer on outcomes in patients admitted to the coronary care unit, *Arch Intern Med*, n° 160, p. 1878.
17. Why so much medical research is rot. (2007). *The Economist*, n° 382, p. 84.
18. Pearce MS *et al.* (2012). Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study. *Lancet*, Aug 4, n° 380(9840), p. 499-505.
- 19 http://www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Actualites/Documents/IRSN_Note-lecure-etude-britannique-scanner-enfant_062012.pdf
- 20 Sermage-Faure C *et al.* (2012). Childhood leukemia around French nuclear power plants-the Geocap study, 2002-2007. *Int J Cancer*, Sep 1, n° 131(5), p. E769-80.
21. Laurier D, Hémon D, Clavel J. (2008). Childhood leukaemia incidence below the age of 5 years near French nuclear power plants. *J Radiol Prot*, n° 28, p. 401-403.
22. Evrard AS *et al.* (2006). Childhood leukaemia incidence around French nuclear installations using geographic zoning based on gaseous discharge dose estimates. *British Journal of Cancer*, n° 94, p. 1342-1347.
23. Sermage-Faure C *et al.* (2013). Childhood leukaemia close to high-voltage power lines – the Geocap study, 2002–2007. *B J Cancer*, p. 1-8.
24. Réseau de Transport de l'Électricité.
25. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23949150>

Effets sanitaires des faibles doses de rayonnements ionisants : origine et actualité d'une controverse

Health effects of low level exposure to ionizing radiation: origin and development of a controversy

Roland MASSE¹

Résumé

L'évaluation du risque sanitaire consécutif à l'exposition de l'homme à des doses de rayonnements ionisants inférieures à 100-200 mSv est à l'origine de controverses, en particulier au moment des choix en matière de transition énergétique. Ni les données épidémiologiques, ni les données expérimentales ne permettent de préciser la forme de la relation dose-effet à partir de l'origine. Les résultats récemment acquis par le suivi prolongé d'enfants et de jeunes adultes, après examens radiologiques de tomographie computationnelle (CT Scans), montrent cependant que des doses de 50 à 60 mGy délivrées à fort débit sont à l'origine d'un excès de différentes tumeurs, en particulier leucémies et cancers du cerveau.

À partir des données épidémiologiques et expérimentales, cet article examine la plausibilité de la relation linéaire sans seuil utilisée pour la radioprotection pour fixer les limites d'exposition du public et des professionnels. Cette plausibilité est faible ; néanmoins, l'utilisation de la relation linéaire sans seuil permet de situer l'ordre de grandeur du risque engendré par le développement de l'énergie nucléaire civile comme source d'énergie. Il apparaît ainsi de manière très évidente que cette ressource est économe du point de vue des conséquences sanitaires qui en découlent, en particulier par rapport à l'utilisation des combustibles fossiles et de la biomasse.

Mots-clés

Rayonnements ionisants, faibles doses, relation dose-effet, cancers radio-induits, effets héréditaires, coût sanitaire de l'énergie, mesure et comparaison des risques.

Abstract

Health hazard assessment related to doses of ionizing radiation lower than 100-200 mSv is a matter of controversy, and more acutely when choosing transition towards a new energetic paradigm. Neither epidemiological nor experimental data can be used to determine the shape of the dose-effect relationship from 0 to 100 mSv. Recently, however, long term follow-up of children and young adults exposed to CT scans evidenced that doses of 50 to 60 mGy delivered at high dose-rate were associated to a significant increase of leukemias and cancers, including brain cancer.

On the basis of the available data, this article leaves some questions about the plausibility of the linear no threshold hypothesis (LNT) used by radiological protection bodies to control overexposure of the members of public and workers. It concludes that although the plausibility of LNT is fairly weak, using LNT helps to situate the order of magnitude of health risks associated with the development of nuclear power plants and to compare them with those resulting from burning fossil fuels and biomass; the results show that sparing human lives can only be achieved with nuclear for the same quantity of energy produced.

Keywords

Ionizing radiation, low doses, dose-effects relationships, radio-induced cancers, hereditary effects, health care costs of energy, measuring and comparing risks.

Introduction

Quels que soient le lieu et le mode de vie, nul ne peut échapper à la radioactivité ambiante. Cette radioactivité dépend de sources cosmiques et telluriques et peut varier d'un facteur 10 entre 2 points selon le lieu et l'altitude, les valeurs extrêmes couvrent une échelle de 1 à 100.

Le corps humain est lui-même source radioactive, retenant différents radionucléides naturels comme le potassium 40 et les chaînes radioactives de l'uranium et du thorium, témoignages de la formation de l'univers et de la persistance des radioéléments à très longue période. Ces radioéléments atteignent l'homme par la chaîne alimentaire et par l'atmosphère où le radon d'origine tellurique est un constituant majeur.

Les rayonnements ionisants² émis par les sources radioactives ont des effets toxiques sur les cellules vivantes. Cependant, toutes les espèces de la planète ont évolué en présence de rayonnements ionisants. Au cours des 3,5 milliards d'années d'évolution des espèces vivantes, et plus particulièrement des 600 derniers millions d'années qui ont vu exploser la concentration de l'oxygène dans l'atmosphère, des systèmes efficaces de défense ont été sélectionnés. Ils permettent à la fois de corriger les effets des toxiques radicalaires dérivés de l'oxygène moléculaire et ceux des rayonnements ionisants. Rien d'étonnant à cela, les radicaux formés après radiolyse de l'eau intracellulaire sont en très grande partie responsables de l'action toxique des rayonnements ionisants et identiques à ceux créés spontanément par la cellule vivante lors du métabolisme cellulaire. On peut donc s'attendre à ce que l'ajout au milieu de faibles sources de rayonnements ionisants ne bouleverse pas l'équilibre de la détoxification radicalaire.

1. Origine de la controverse sur les effets des faibles doses

Des doses élevées de rayonnements ionisants de plus de 100 mSv délivrés en un temps bref ont des effets immédiats et retardés sur la santé. Avec les rayons X, découverts en 1895, on a su dès 1902 que les rayonnements ionisants étaient capables de provoquer des cancers de la peau et, quelques décennies plus tard, un excès évident de leucémies chez les radiologues et

leurs assistants justifiait qu'on mette en œuvre un système de radioprotection destiné à la prévention de ces effets.

Une bonne prévention suppose que les relations quantitatives entre expositions et effets soient appréciées avec suffisamment de précision. Très rapidement dans les années 50, hors situation d'exposition délibérée ou accidentelle à de fortes doses, il est apparu que seuls³ deux types d'effets – cancers et effets génétiques – nécessitaient une évaluation plus précise de la relation dose-effet pour protéger le public, les patients et les professionnels. Depuis cette période, débutant dans l'après-guerre, l'acquisition des connaissances de ces relations par l'épidémiologie et l'expérimentation animale a été continue jusqu'à nos jours et a fait l'objet d'une succession de rapports de l'United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation : UNSCEAR (1). Bien que cela ait été redouté dans les années 50 par les radiobiologistes, aucun effet génétique délétère n'a été établi dans les groupes humains particulièrement exposés aux rayonnements ionisants ; l'évaluation de ce risque a donc dépendu uniquement des observations faites sur les espèces animales de laboratoire.

Les rayonnements ionisants sont par contre un facteur de risque bien connu de cancer chez l'homme. On peut en retrouver trace fort loin dans le temps : au XV^e siècle déjà, on décrivait, dans les mines d'argent des montagnes de Saxe et de Bohême exploitées depuis le XIII^e siècle, les maladies du poumon qu'entraînait « l'air dangereux des profondeurs de la terre ». Plus de 70 % des mineurs mouraient jeunes d'affections qui devaient être identifiées bien plus tard comme des cancers du poumon en majorité dus au radon (Masse, 2003).

De nombreuses autres situations médicales, accidentelles ou délibérées, ont permis d'établir qu'il existait une relation de dose à effet entre l'exposition aux rayonnements ionisants et l'excès de divers cancers chez l'Homme. L'étude dans la durée des effets observés sur la centaine de milliers de survivants des bombardements d'Hiroshima et de Nagasaki constitue la source d'information la plus fiable. Le nombre total de cancers en excès est de plusieurs centaines de cas, ne représentant que quelques % des cancers apparaissant spontanément. Leur mise en évidence a donc demandé un travail considérable en épidémiologie, conséquence de la faible capa-

cité des rayonnements à induire un cancer, d'une part et, d'autre part, de la fréquence élevée du cancer dans les populations à niveau de vie élevé (plus de 40 % dans la population du Japon).

Cette observation fixe des limites à la faisabilité des études épidémiologiques lorsqu'il s'agit de caractériser le niveau de risque attribuable à de faibles expositions, compte tenu du fait que les cancers induits par les rayonnements ionisants ne se distinguent pas des cancers causés par d'autres facteurs de risque. Dès 1980, Charles Land (1980) fit l'analyse théorique de la relation dose-effet et alerta sur les limites de l'observation épidémiologique. En réalité, ce sont ces limites qui sont à l'origine du « problème des faibles doses » qui reflète, lui, l'incertitude que l'on a de l'existence ou non d'effets délétères des rayonnements sur la santé dans une plage d'exposition où ils ne peuvent plus être détectés par l'observation épidémiologique. Les limites sont de nature statistique. Dans le cas du cancer du sein, par exemple, Land montra que si une exposition unique de 1 Sv engendre un risque avéré de cancers du sein de 600 cas par an et par million de femmes exposées, mettre en évidence statistiquement ce risque pour une exposition dix fois plus faible nécessite 10 000 patientes suivies pendant 10 ans ; et si on cherche à établir ce risque pour une exposition 100 fois plus faible, il faudra un effectif impossible à atteindre de 100 millions de patientes ! Comme le sein est l'un des tissus les plus sensibles au cancer radio-induit, on voit qu'il n'y a pas de possibilité de trancher par l'observation épidémiologique l'existence ou non de cancers induits par de faibles doses. Mais Charles Land, comme la plupart des experts de l'époque, donne une solution :

“These difficulties are unlikely to be overcome by sample size expansion or by curve fitting, unless it can be established independently that the dose-response relationship is a particularly simple one. Research into the biological mechanisms of carcinogenesis would appear to be an essential part of the estimation process, by which plausible models can be derived. In the case of radiation carcinogenesis, radiobiological theory suggests that linear model analyses, confined to doses under a few hundred rads⁴ to low-LET radiation, may give credible upper limits of risk”.

Charles Land fait ici appel à une théorie simple, censée représenter le mécanisme intime de la cancérogenèse : celle de l'origine du cancer par mutation somatique. Les cancers sont en

effet des clones de cellules mutées. Ce qu'ajoute implicitement la théorie, c'est que l'augmentation des mutations initiales est suffisante pour expliquer l'augmentation de la fréquence des cancers. La notion de la linéarité entre la dose et l'effet s'impose⁵ si l'on ajoute à ce concept celui de lien direct entre le dépôt aléatoire d'énergie dans l'ADN par les rayonnements ionisants au cours d'un événement unique et la mutagenèse qui peut en résulter.

Un argument circulaire !

À partir de là, l'hypothèse de linéarité sans seuil (*Linear No Threshold* ou LNT dans les ouvrages en langue anglaise) est devenue un quasi-dogme. Elle fait certes l'objet de débats actuels sur la légitimité de l'approche biologique, mais elle a suffisamment imprégné les esprits pour que le lissage des courbes statistiques, décrivant le lien entre exposition et effet, soit une pratique définitivement utilisée en épidémiologie. On fait comme si la relation était linéaire, et on en déduit les coefficients caractérisant les pentes. C'est en réalité un argument circulaire dénoncé par Breckow (2006) :

“Recently, authors of some epidemiological studies tried to quantify—and some even claimed to having found evidence for a significant increase of risk in the dose range of some 10 mSv⁶;... However, all cited estimates only hold under the precondition of LNT. Without this (or even any other) extrapolation model none of these studies would give evidence to any increased cancer rate...”

Malgré cette erreur logique, un très grand nombre de publications utilisent cette pratique, bien souvent sans dire où se trouve réellement la limite statistique de validité du calcul. Dans la très grande majorité des cas, il est possible de montrer que la dose au-dessus de laquelle apparaissent statistiquement des excès de cancer est environ 10 fois supérieure à cette dose de 10 mSv. C'est celle que retiennent aussi bien les Académies des sciences en France et aux États-Unis, l'ONU, l'OMS, la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) et l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN).

Par ailleurs, l'impact de la LNT dans l'opinion est renforcé par l'usage implicite qui en est fait néanmoins par les réglementations nationales par commodité de gestion des doses professionnelles et au nom du principe de précaution.

Il se crée de cette manière une nouvelle source d'argument circulaire dénoncée en 2006 par T. Rockwell :

“Policy makers advocate use of LNT because they argue it can do no harm to do so (ICRP-2005, Exec Summary). They claim one cannot prove lack of harm because it would require a test population of millions to get a statistically significant answer. But this is true only if LNT is true, so we have a silly syllogism: If LNT is true then we cannot prove LNT is true, so we must assume LNT is true.” (Rockwell, 2006).

2. Quelques données épidémiologiques qui alimentent le débat concernant le risque cancérigène induit par de faibles doses

2.1 Travailleurs du nucléaire

Les travailleurs du nucléaire sont exposés en moyenne à un excès de radiation de l'ordre de grandeur de la radioactivité naturelle ambiante, ce qui n'exclut pas des valeurs supérieures pour certains groupes. La réglementation actuelle en fixe le niveau maximal à 20 mSv par an dans les conditions normales de fonctionnement des installations.

Les travailleurs du nucléaire font moins de cancer que la population générale. Si l'on compare directement des groupes humains de même âge et de statut social équivalent, les travailleurs d'EDF exposés font environ 40 % moins de cancers que leurs homologues (en grande majorité également travailleurs). Cet effet connu sous le vocable « effet du travailleur sain » n'a pas d'explication autre que celle d'une sélection d'une population en bonne santé et mieux suivie médicalement que la moyenne. Cette explication demanderait à être établie sur des bases biologiques solides montrant comment cette sélection pourrait avoir un tel impact sur le risque de cancer. On estime pouvoir s'affranchir de cette difficulté en utilisant l'ensemble des travailleurs de l'entreprise comme population de référence interne et en recherchant la variation du taux de cancer en fonction du niveau de l'exposition cumulée. Avec ce critère, il n'y a pas non plus d'excès de cancers

imputables aux rayonnements ionisants chez les 36 769 travailleurs d'EDF et d'AREVA suivis en moyenne jusqu'à l'âge de 60 ans (Metz-Flamant, 2011). La dose moyenne externe cumulée chez les travailleurs exposés (57 % de la cohorte) est de 21,7 mSv. Un excès de mélanome et de cancers de la plèvre est observé sans lien plausible avec l'exposition, ce qui suggère que certains autres facteurs environnementaux ou du mode de vie ne sont pas répartis de manière aléatoire parmi les travailleurs.

Le CIRC a conduit deux méta-analyses à dix ans d'intervalle sur les cancers des travailleurs du nucléaire de quinze pays (Cardis *et al.*, 1995 ; Cardis *et al.*, 2005). Dans la première, de 1995, il n'apparaît pas d'excès attribuable pour une dose moyenne de 40 mSv. L'étude la plus récente (2005) portant sur la mortalité par cancer de 400 000 travailleurs décèle un faible excès de cancers, par rapport aux non-exposés, chez les travailleurs exposés en moyenne à 19 mSv, ce qui pourrait représenter 1 à 2 % de l'ensemble des cancers. Cet excès est dû en majorité à un contingent important de cancers du poumon et disparaît si on exclut ce site. Compte tenu du poids majeur du tabagisme actif et passif sur la cancérogenèse pulmonaire, on ne peut retenir la relation causale de l'irradiation que si on admet que le tabagisme est identique chez les exposés et non-exposés, ce qui ne peut aller de soi (Le Guen et Masse, 2007). Par ailleurs, seule l'hypothèse LNT, que cette étude ne démontre pas comme le rappelle Breckow (2006), permet d'affecter un excès de cancer à une exposition aussi faible que 19 mSv.

En amont du cycle nucléaire, la mine d'uranium est un lieu d'exposition à diverses sources de rayonnements ionisants dont le radon constitue la plus significative du point de vue sanitaire. Le groupe humain le plus affecté est constitué par les 400 000 mineurs de l'ex-RDA chez qui 7 695 cancers du poumon ont été jugés imputables à cette exposition (Kreuzer *et al.*, 2011). On peut toutefois difficilement parler de faibles doses dans le cas de l'exposition au radon : l'impact des rayonnements alpha, émis par le radon dans les cellules traversées, laisse en moyenne un dépôt d'énergie dans le noyau équivalant à environ 350 mGy, et la répartition des cellules impactées est très hétérogène. C'est une relation dose-effet qu'il faut traiter spécifiquement (ICRP, 1993) ; il demeure que le radon constitue un facteur de risque cancérigène avéré en milieu professionnel et qu'il mérite l'attention des autorités

sanitaires dans l'environnement domestique en raison notamment de son action combinée avec le tabagisme.

2.2 Expositions médicales

Malgré la fréquence des irradiations médicales diagnostiques et thérapeutiques, peu d'études médicales se prêtent à une évaluation de l'effet des faibles doses sur la production de cancers radio-induits. Dans leur rapport de 2005 (Académie nationale de médecine, 2005) les Académies des sciences et de médecine proposent une méta-analyse de 20 études de cohortes dont l'exposition est comprise entre 10 et 100 mSv : pour 415 000 sujets, avec 18 ans de suivi et 8 514 cancers et 292 leucémies observés, il n'est pas établi d'excès par rapport aux populations de référence non exposées.

Récemment cependant, deux études majeures au Royaume-Uni et en Australie établissent un effet cancérigène associé à la pratique du CT scan (*Computed Tomography*) chez l'enfant et le jeune adulte. Dans l'étude anglaise (Pearce *et al.*, 2012), regroupant 180 000 sujets suivis pendant environ 10 ans, 75 leucémies et 135 cancers du cerveau sont observés, correspondant à un triplement du taux de base pendant la période considérée pour des doses délivrées aux organes évaluées respectivement à 50 et 60 mGy. L'étude australienne (Matthews *et al.*, 2013) porte sur 680 000 jeunes sujets pendant un temps de suivi analogue, et concerne 3 150 cancers parmi lesquels 608 sont en excès chez les sujets exposés. Les doses aux organes ne sont pas précisées, mais on peut penser qu'elles sont du même ordre de grandeur que dans l'étude anglaise. L'expression de l'exposition dans l'étude australienne est « mutualisée » sous la forme de dose efficace, ce qui n'a pas vraiment de sens dans le cas d'expositions aussi hétérogènes que celles résultant du CT scan ; cette expression de la dose fait apparaître un excès de risque significatif pour une « dose efficace » de 5-15 mSv.

Ces études confirment la sensibilité de l'enfant et du jeune et démontrent, dans ce groupe d'âge, que l'existence d'un seuil à l'effet des faibles doses doit nécessairement se situer en dessous de 50 mGy pour les rayonnements X délivrés à fort débit.

2.2.1 Incertitudes sur l'exposition médicale *in utero* :

La légitimité de la LNT a été examinée par les institutions scientifiques américaines et françaises avec des conclusions différentes malgré l'utilisation des mêmes données scientifiques. L'Académie des sciences américaine (National Research Council of the National Academies of USA, 2006) considère que l'ensemble des arguments présentés contre la LNT n'est pas suffisant pour la rejeter, contrairement à la position prise par les Académies des sciences et de médecine en France (Académie nationale de médecine, 2005). La fiabilité des données épidémiologiques concernant les leucémies induites après exposition du fœtus au cours des examens radiologiques de la mère est un point majeur de désaccord. Il s'agit surtout de l'étude d'Oxford, datant des années 1950, qui mettrait en évidence un excès de leucémies (et d'autres cancers de l'enfant) après des expositions équivalant à 5 à 10 fois l'exposition naturelle moyenne annuelle. Une réévaluation des données par des épidémiologistes de renom n'a pas permis d'exclure cette étude sur la base d'erreur de protocole, bien que les doses délivrées n'aient pu être réellement mesurées. Les incertitudes sont suffisantes néanmoins pour que différentes institutions dont le Centre International de Recherches sur le Cancer (CIRC) et le rapport des Académies des sciences et de médecine en France aient récusé l'étude d'Oxford. Par ailleurs, aucune des études modernes depuis les années 70 ne lie radiodiagnostic *in utero* et leucémies de l'enfant, et il n'a pas été observé d'excès significatif de leucémies chez les enfants irradiés pendant la grossesse de leur mère, ni à Hiroshima ni à Tchernobyl (Tubiana *et al.*, 2007). On ne peut néanmoins exclure actuellement que des leucémies soient induites chez l'enfant et le fœtus pour des doses quelque peu inférieures à celles qui conduisent à un excès de cancer chez l'adulte.

2.3 Expositions environnementales

2.3.1 Naturelles

Les variations de la radioactivité naturelle⁷ de 1 à 10 suggèrent qu'il y a là une source importante de connaissances sur les effets des faibles doses ; néanmoins, cette approche n'a fourni aucun élément permettant de suggérer leur effet néfaste sur la santé. La puissance statistique de ces études est généralement faible. Certaines, néanmoins, en Inde (Nair *et al.*, 2009) et en Chine (Tao *et al.*, 1999), proposent des effectifs de plus de 100 000 résidents et un suivi prolongé dont les résultats peuvent très bien être interprétés comme une absence d'effet des doses reçues, voire un moindre taux de cancer dans les régions les plus exposées, ceci jusqu'à un niveau d'exposition cumulé équivalant à 5 fois la valeur au-dessus de laquelle on distingue un excès de cancer à Hiroshima et Nagasaki.

2.3.2 Accidentelles

L'accident de Tchernobyl a sérieusement contaminé des larges territoires par les retombées radioactives et contribué ainsi à augmenter significativement l'exposition naturelle (1). Les résultats du suivi épidémiologique des populations ont fait redécouvrir la grande sensibilité de la thyroïde chez le jeune et l'adolescent, et ont montré l'importance de protéger la thyroïde de la fixation d'iode radioactif rejeté lors des accidents nucléaires. Pour n'avoir pas pris suffisamment en compte ce risque, près de 8 000 cancers ont été enregistrés et 15 décès ont été déplorés jusqu'en 2002. Il ne s'agit cependant pas de faibles doses car la dose moyenne thyroïdienne est de l'ordre du Gy chez les jeunes atteints de cancers.

Par contre, il n'a pas été possible de distinguer une augmentation significative du risque cancérigène dans la gamme d'exposition inférieure à 100 mSv. Dans la population plus exposée des « liquidateurs », qui sont intervenus précocement sur les sites contaminés et font l'objet d'une surveillance particulière, une augmentation des leucémies affecte une fraction de la population. Cet excès n'est pas significatif rapporté à l'ensemble du groupe des 500 000 intervenants (UNSCEAR, 2008-2011). Chez les 111 000 intervenants ukrainiens, l'excès est toutefois significatif si on inclut les leucémies lymphoïdes chroniques réputées non induites par irradiation (Zablotska *et al.*, 2013).

Des doutes existent concernant la faisabilité des études épidémiologiques dans les populations affectées par l'accident de Tchernobyl : aucune anticipation des difficultés de telles études n'avait été prévue, et le suivi des populations est rendu difficile par l'absence de prise en charge précoce. On peut espérer que l'enquête épidémiologique projetée sur les 2 millions d'habitants de la préfecture de Fukushima permette de mieux situer les marges d'exposition où une augmentation de cancers est détectable, mais cet effort demandera à être poursuivi pendant des décennies, et le niveau heureusement relativement faible des expositions en laisse la possibilité incertaine.

D'autres groupes humains exposés de longue date font l'objet d'enquêtes épidémiologiques. C'est notamment le cas des riverains de la Techa, rivière où ont été rejetés sans traitement les déchets du programme nucléaire soviétique militaire à partir des années 1950. Des excès de leucémies et de cancers sont notés mais rien ne peut en être déduit pour les expositions inférieures à 100 mSv (Krestinina *et al.*, 2005).

2.3.3 Environnement des centrales

Le fonctionnement d'une installation nucléaire génère des déchets et émet des rejets strictement contrôlés. Il contribue ainsi à augmenter la radioactivité ambiante. L'impact en est cependant faible, au plus de l'ordre de 1 à 10 % de l'exposition ambiante naturelle.

Régulièrement (Laurier *et al.*, 2008), le problème d'un lien possible entre la localisation des installations et le taux de leucémies et des cancers dans les populations du voisinage est soulevé mais il ne résiste pas à l'analyse statistique. Certaines études établissent une relation entre une augmentation des leucémies de l'enfant et le degré de proximité des installations. C'est le cas en particulier de l'étude IRSN-INSERM de 2012 qui observe un excès de leucémies infantiles dans un rayon de 5 km autour des centrales nucléaires en France entre 2002 et 2007. Ces faits demandent à être interprétés avec prudence en raison de la forte incertitude statistique, de la période de temps limitée où l'excès peut être détecté, de l'absence d'excès lorsque le zonage est basé sur les doses dues aux rejets, et de la plausibilité de nombreux autres facteurs que l'irradiation pour expliquer l'augmentation observée. Ces faits sont reconnus par les auteurs qui

excluent une relation de causalité avec l'exposition aux rayonnements ionisants (Clavel, 2012).

Les corrélations temporelles, sans relation dose-effet, sont à la base de nombreuses interprétations causales biaisées en matière de faibles doses. Ceci est particulièrement apparent dans les enquêtes régionales en ex-URSS après l'accident de Tchernobyl (Charles, 2010). La surveillance épidémiologique locale demande un protocole adapté. En France, à la suite d'une saisine de la Direction Générale de la Santé en 2007, divers protocoles ont été mis en place par l'Institut National de Veille Sanitaire pour les centres miniers du Limousin, d'enfouissement des déchets à Soulaïnes et du site de production du Tricastin (INVS, 2012).

3. Effets héréditaires

Quoique bien documentés et revus régulièrement par l'UNSCEAR pour d'autres organismes vivants, les effets héréditaires de l'irradiation n'ont jamais été observés chez les humains. Les enquêtes épidémiologiques sur les populations humaines irradiées (après irradiation médicale, survivants de la bombe atomique ou travailleurs) n'ont, à ce jour, pas mis en évidence d'accroissement des pathologies héréditaires pour des doses de rayonnements ionisants compatibles avec la survie et la procréation. En particulier, les études des populations qui vivent dans des zones à « forte » radioactivité ambiante en Chine et en Inde confirment l'absence d'effet observable pour des irradiations très supérieures à l'ambiance moyenne.

La transmission, pendant une période très limitée, de traces détectables de l'exposition des cellules germinales paternelles dans l'ADN de la descendance a cependant été observée chez les enfants des liquidateurs de Tchernobyl en 2002 et retrouvée chez les riverains de la Techa (Dubrova *et al.*, 2006). Ces altérations affectent des zones non codantes de l'ADN (minisatellites) et ne sont pas connues actuellement pour induire des maladies. Cependant, la possibilité d'un rôle de contrôle de ces constituants⁸ (qui constituent plus de 95 % de l'ADN total) sur l'activité des gènes laisse ouverte une possibilité d'effets non pris en compte jusqu'à présent.

D'autres effets que les cancers ou les effets génétiques ont été envisagés. La mise en évidence de perturbations de la signalisation cellu-

laire à faible dose laisse envisager que certaines pathologies pourraient en être directement augmentées. On cite les maladies cardio-vasculaires, les opacités cristalliniennes, les troubles de l'immunité et les effets sur le système nerveux central notamment. Cela reste une hypothèse ouverte mais la revue qu'en a faite l'UNSCEAR (UNSCEAR, 2012) n'établit pas la réalité de ce risque dans les populations exposées à moins de 50 fois l'exposition naturelle. C'est néanmoins un domaine où la recherche doit se développer.

4. Approche expérimentale des faibles doses

4.1 Cancérogénèse

Si l'expérimentation animale ne peut se substituer à l'épidémiologie, elle permet néanmoins de donner des indications générales destinées aux extrapolations dans des domaines où l'épidémiologie est muette. De multiples protocoles d'exposition pour lesquels on ne disposait pas de données épidémiologiques ont ainsi pu être mis en œuvre, éclairant notamment :

- le rôle de la qualité du rayonnement ;
- l'effet des contaminations internes chroniques ;
- le rôle du débit et du fractionnement de dose ;
- le rôle des expositions combinées.

Ces aspects ont été régulièrement évalués dans les rapports UNSCEAR depuis 1958, mais ils ne permettent pas d'établir un risque de cancer pour des doses inférieures à 150 mGy (UNSCEAR, 2000). La possibilité de relations non monotones avec un effet de protection des doses les plus faibles contre les cancers spontanés a été évoquée et mise en évidence dans certaines lignées ; cependant, le manque de protocoles adaptés à la mise en évidence de cet effet d'hormesis ne permet pas de généraliser l'observation (Crump *et al.*, 2012).

D'autres observations en cancérogénèse expérimentale ne sont pas favorables au concept de linéarité des relations dose-réponse. En particulier, les interactions de proximité avec des cellules non irradiées inhibent le développement des lésions précancéreuses de la peau (Burns et Albert, 1986), phénomène observé également *in vitro* (Portess *et al.*, 2007). Dans d'autres modèles comme celui de la souris transgénique « patched », modèle du syndrome de Gorlin chez l'homme, caractérisé par une mutation d'un gène

impliqué dans l'embryogenèse et fonctionnant comme un répresseur de tumeur, notamment des cancers de la peau et du cerveau, la protection du cerveau sous un écran de plomb ne suffit pas à protéger contre la survenue des tumeurs du cerveau induite par l'exposition du reste du corps (Mancuso *et al.*, 2008). Chez la rate, il est possible de montrer que c'est de l'interaction de plusieurs types cellulaires que naît l'adénocarcinome mammaire et non par impact direct des rayonnements sur les cellules spécifiques qui vont le constituer (Barcellos-Hof, 2010). Alors que la théorie quasi balistique du cancer résultant d'une interaction aléatoire entre le rayonnement et un gène critique se prête bien à une modélisation linéaire à faible dose, les interactions cellulaires complexes avec leur microenvironnement, qui semblent être de règle en matière de cancérogenèse tissulaire, ne permettent pas de prévoir quelle peut être la forme de la relation dose-effet dans le domaine des faibles doses.

4.2 Effets cellulaires des faibles doses en relation avec la cancérogenèse

L'une des conditions préalables à la théorie de linéarité des relations dose-effet est que les mêmes phénomènes initiaux soient impliqués à faible et forte doses, ne se distinguant que par l'intensité de leurs manifestations. Cela est évident pour le dépôt aléatoire d'énergie dans la cible la plus pertinente que constitue l'ADN cellulaire, mais les conséquences peuvent en être modulées selon la dose et le débit considérés.

La première notion à prendre en considération est qu'il existe un important « bruit de fond » de lésions de l'ADN provoqué par le métabolisme cellulaire : plus de 10 000 lésions simple brin, des milliers de modifications de base, 8 ruptures double brin y sont induites chaque jour (Burkart *et al.*, 1999). Il y a donc une dilution des lésions radio-induites dans un flux continu d'événements spontanés dont le traitement par les enzymes de réparation va dépendre de leur concentration dans le temps et l'espace, ce qui tend vers une non-linéarité de la réparation en fonction de la dose et du débit (Neumaier *et al.*, 2012).

Il existe également de nombreuses observations montrant que dose et débit influencent par différentes voies l'efficacité de la réparation de l'ADN (Tubiana *et al.*, 2009). En outre, la signalisation cellulaire mise en œuvre en réponse aux

lésions initiales de l'ADN n'est pas identique à faible et forte doses ; les gènes impliqués dans la réparation ne sont pas les mêmes, et les effets qui en découlent : mortalité, mutagenèse, restitution *ad integrum* sont modulés en fonction de la dose et du débit (Académie nationale de médecine, 2005). L'importance de ces mécanismes de signalisation bouleverse en fait la compréhension de l'effet des faibles doses (Averbeck, 2010).

L'une des voies d'identification de l'effet des faibles doses est la recherche de signatures spécifiques à l'action des rayonnements. Les lésions complexes induites dans l'ADN pourraient constituer un marqueur (Hayes, 2008) ; cependant, l'effet létal de ces lésions semble le plus probable, et la preuve de leur implication dans la cancérogenèse reste à établir (Averbeck *et al.*, 2006). Il n'existe pas, par ailleurs, de signature moléculaire caractérisant l'origine radio-induite de la cancérogenèse dans les tissus. Quelques résultats après de fortes ou de très fortes doses laissent penser que ce n'est pas impossible (Ory *et al.*, 2003), mais on ne sait pas discerner actuellement ce qui est dû à l'apparition d'un cancer par les voies habituelles de cancérisation sur un tissu modifié par l'irradiation de ce qui pourrait revenir à une cancérisation spécifique à l'irradiation sur des tissus normaux.

La possibilité de détecter *in vitro* les effets de très faibles doses de l'ordre du mGy ou inférieure au mGy par les traces moléculaires de la réparation de l'ADN (Rothkamm et Löbrich, 2003) autorise à caractériser les susceptibilités individuelles (Colin *et al.*, 2011), et les résultats montrent une variabilité génétique individuelle significative. Cependant, les preuves que ces variations pourraient affecter la réponse cancérogène à de faibles doses d'irradiation restent très faibles et n'ont pas été prises en compte pour la protection individuelle des personnes exposées (ICRP, 2007). La majorité des renseignements acquis en expérimentation montrent par ailleurs la résilience des organismes animaux par rapport à l'observation *in vitro*. Par exemple, on peut détecter *in vitro* l'effet mutagène de faibles doses sur l'ADN cellulaire mais, *in vivo* chez la souris, une exposition chronique à faible débit équivalent à 400 fois la radioactivité naturelle n'a pas d'effet mesurable (Olipitz *et al.*, 2012). *In vitro*, il a pu être montré que le tritium de certains précurseurs de l'ADN avait un effet létal sur le développement de l'embryon 10 000 fois plus intense que lorsque le tritium est introduit sous forme d'eau tritiée ; cependant, le ratio n'est plus que de 10 dans les

cas d'une exposition *in vivo* (Muller, 2010).

5. Bilan sanitaire comparé des différentes filières de l'énergie

La commission européenne a réuni, de 1990 à 2006, un ensemble de rapports destinés à comparer le coût externe des différentes sources d'énergie dans la production d'électricité, depuis l'amont jusqu'à l'aval de leurs cycles de vie. Ces rapports dénommés ExternE⁹ font apparaître de manière évidente, que la part relative au coût sanitaire est déterminante. Un effort comparable a été consenti aux États-Unis en 2010 avec les mêmes conclusions générales (National Research Council, 2010). Évaluer le coût de la vie humaine dans ce contexte est une difficulté que les économistes contournent en proposant d'évaluer le consentement à payer pour éviter les conséquences délétères du développement des énergies. Il est possible néanmoins de traduire ces évaluations en termes de morbidité et de mortalité, bien qu'il y ait des limites à l'exercice en raison de la connaissance imparfaite que l'on a des effets délétères sur la santé en fonction de l'âge et de l'état de santé des populations affectées. Une évaluation pour l'Europe a été proposée en 2007 (Markandya et Wilkinson, 2007). Exprimée en mortalité ou morbidité par TWh produit, cette évaluation permet de classer sans ambiguïté les ordres de grandeur des effets occasionnés. Lignite et charbon, avec un taux de mortalité supérieur à 20 par TWh et un taux de morbidité sévère plus de 10 fois supérieur, ont le coût le plus élevé. Le pétrole et ses dérivés ont des coûts un peu plus faibles ; le gaz est environ 10 fois moins dangereux ; la biomasse est intermédiaire. Quant au nucléaire, même en considérant légitime l'extrapolation linéaire sans seuil appliquée à l'ensemble de la population mondiale et en prenant en compte accidents et fonctionnement normal, le coût sanitaire se situe à un niveau plus de 10 fois inférieur au gaz, et plus de 100 fois inférieur au charbon, travailleurs et public inclus.

Le résultat peut être un peu différent si on raisonne en perte d'espérance de vie, dans la mesure où de faibles doses ont un impact important sur les plus jeunes ; mais même avec cette hypothèse, le recours au nucléaire reste une voie très économique en termes de vies épargnées par TWh produits (Richter, 2012). Prenant cette perspective en considération, il est possible, sans

verser dans le paradoxe, de calculer le nombre de vies épargnées par le recours à la filière nucléaire par rapport aux combustibles fossiles (Kharetscha et Hansen, 2013) ! En prenant comme base les évaluations de Markandya (Markandya et Wilkinson, 2007), avec 20 000 TWh produits dans le monde en 2008 et 41 % de cette énergie provenant du charbon, ce sont 200 000 décès par an qui pourraient être évités.

Cette situation traduit en fait le scepticisme de l'opinion sur la réalité des dangers imputables à la pollution atmosphérique. D. Zmirou en a cependant rappelé l'importance dans ce colloque, et l'ensemble des publications les plus récentes confirment la réalité de l'impact et la convergence des résultats, qu'ils soient obtenus en Europe ou aux États-Unis (Declercq *et al.*, 2012 ; Krewski *et al.*, 2009 ; APHENA, 2009). Une difficulté subsiste quant à la nature réelle des éléments impliqués dans cette toxicité. Les particules fines sont les candidats les plus vraisemblables, mais il n'est pas établi que leur nature chimique ou physique soit indifférente ; en particulier, les particules fines dérivées par nucléation des phases gazeuses riches en SO₂ et NOx représentent une fraction importante de l'ensemble des particules fines, mais il n'est pas clairement établi que leurs effets délétères soient les mêmes que ceux des particules fines carbonées. La prise en compte ou non de ce contingent dans l'attribution de la morbidité et de la mortalité peut amener à des évaluations sensiblement différentes en matière de coût sanitaire des sources d'énergie, mais elle ne bouleverse pas la hiérarchie générale que domine de très loin l'utilisation du charbon et de la biomasse si on prend en compte l'utilisation domestique dans le monde des combustibles à foyers ouverts, comme le rappelle régulièrement l'OMS (WHO, 2006).

Conclusion

Ni les données épidémiologiques, ni les données expérimentales ne permettent de connaître avec suffisamment de certitude la forme de la relation dose-effet dans le domaine des faibles doses de rayonnements ionisants. La nature des phénomènes mis en jeu n'est pas en faveur de la linéarité et peut accepter de multiples hypothèses pour modéliser le risque, y compris celle de seuils et de relations non monotones. Il n'existe pas de données établissant que l'extrapolation linéaire sous-estime le risque, ce qui autorise les autorités sanitaires à favoriser cette évaluation pu-

dente au titre de la protection des personnes, mais elle ne justifie pas que la linéarité soit considérée comme une vérité établie. Ce qui la justifie, par contre, en matière d'énergie, c'est qu'elle permet de mettre en évidence la disproportion des risques engendrés, d'une part, par l'énergie

nucléaire, d'autre part, par le charbon qui constitue actuellement une ressource suffisamment durable pour qu'elle continue d'être attrayante en Europe et, de manière assez incompréhensible, sans alarmer l'opinion.

1. Académie des technologies, Académie de médecine.
2. Rayonnement ionisant : « transport d'énergie sous la forme de particules ou d'ondes électromagnétiques d'une longueur d'onde inférieure ou égale à 100 nanomètres ou d'une fréquence supérieure à 3×10^{15} hertz pouvant produire des ions directement ou indirectement ». L'énergie ou dose absorbée par les tissus se mesure en gray (Gy) valant 1 joule par kg ; les effets biologiques qui en résultent varient selon les tissus affectés et la qualité des rayonnements. L'indicateur de risque pour ces effets est le sievert (Sv) qui est obtenu en affectant à la dose en Gy des facteurs de qualité propres au tissu et au rayonnement considérés. L'exposition naturelle moyenne entraîne une dose de 2,5 mSv par an.
3. Ce point de vue est actuellement débattu, mais les doses où certains effets, comme les opacités du cristallin ou les maladies cardio-vasculaires, sont susceptibles d'être pris en compte sortent en général des limites fixées aux faibles doses.
4. Soit environ 1 000 fois la radioactivité naturelle moyenne annuelle.
5. Il est possible d'imaginer aussi des sous-événements insuffisants pour obtenir le résultat mais dont l'action combinée y contribue. Cette notion est à l'origine de la relation linéoquadratique où la combinaison de deux sous-événements est modélisée sous la forme $\alpha D + \beta D^2$, décrivant de manière satisfaisante, en fonction de la dose D, l'induction de cassures double brin et la survie cellulaire dans de nombreux modèles expérimentaux.
6. Soit environ 5 fois la radioactivité annuelle moyenne, celle pour laquelle Land montre qu'il faut un effectif de 100 millions de patientes pour établir l'augmentation de cancers du sein.
7. En fait de 1 à 100, mais les expositions extrêmes ne concernent que de très faibles effectifs humains, insuffisants pour permettre une enquête.
8. Les résultats du programme international Encode publié dans la revue *Nature* du 6 septembre 2012 établissent que 75 % de cet ADN « poubelle » participent au fonctionnement cellulaire.
9. ExternE : Externality of Energies European Commission : http://www.externe.info/externe_d7/?q=node/4

Références

- Académie nationale de médecine, Institut de France, Académie des sciences (2005). Rapport Conjoint n° 2, *Relation dose-effet et estimation des risques cancérigènes des faibles doses des rayonnements ionisants*. Nucleon, Paris, p. 1-168.
- APHENA (Air Pollution and Health: a European and North American approach). (2009). *Res Rep Health Eff Inst*, Oct, n° 142, p. 5-90.
- Averbeck D. (2010). Non-targeted effects as a paradigm breaking evidence. *Mutat Res*, May 1, n° 687(1-2), p. 7-12. Epub Jan 18.
- Averbeck D., Testard I, Boucher D. (2006). Changing views on ionising radiation-induced cellular effects. *Int. J. of Low Radiation*, n° 3, p. 117-134.
- Barcellos-Hof ME. (2010). Stromal mediation of radiation carcinogenesis. *J Mammary Gland Biol Neoplasia*, n° 15(4), p. 381-387.
- Breckow J. (2006). Linear-no-threshold is a radiation-protection standard rather than a mechanistic effect model. *Radiat Environ Biophys*, n° 44, p. 257-260.
- Burkart W, Jung T, Frasc G. (1999). Damage pattern as a function of radiation quality and other factors. *CR Acad Sci Paris Sciences de la vie*, n° 322, p. 89-101.
- Burns FJ, Albert RE. (1986). Dose-response for radiation-induced cancer in rat skin. In *Radiation carcinogenesis and DNA*

alterations, Burns FJ, Upton AC, Silini G (dir.), Plenum Press, Life Sciences, p. 51-70.

- Cardis E, Gilbert E-S, Carpenter L, *et al.* (1995). Effects of low doses and low dose rates of external ionizing radiation: cancer mortality among nuclear industry workers in three countries, *Radiat Res*; n° 142(2), p. 117-132.
- Cardis E, Vrijheid M, Blettner M *et al.* (2005). Risk of cancer after low doses of ionising radiation: retrospective cohort study in 15 countries. *BMJ*, July 9, n° 331, p. 7508-7577.
- Charles M. (2010). Book Reviews. Chernobyl: Consequences of the catastrophe for people and the environment. *Radiation Protection Dosimetry*, n° 141, p. 101-104.
- Clavel J. (2012). Un taux de leucémie infantile anormalement élevé autour de 10 centrales nucléaires françaises. *Le Journal de la Science*, 13 janvier.
- Colin C, Devic C, Noël A *et al.* (2011). DNA double-strand breaks induced by mammographic screening procedures in human mammary epithelial cells. *Int J Radiat Biol.* Nov, n° 87(11), p. 1103-1112.
- Crump KS, Duport P, Jiang H *et al.* (2012). A meta-analysis of evidence for hormesis in animal radiation carcinogenesis, including a discussion of potential pitfalls in statistical analyses to detect hormesis. *J Toxicol Environ Health B Crit Rev*, n° 15, p. 210-31.
- Declercq D, Pascal M, Chanel O *et al.* (2012). *Impact sanitaire de la pollution atmosphérique dans neuf villes françaises*. Résultats du projet Aphekom. Institut de veille sanitaire, Septembre.
- Dubrova Y, Ploshchanskaya O, Kozionova O, Akleyev A. (2006). Minisatellite germline mutation rate in the Techa river population. *Mutation Res*, n° 602, p. 74-82.
- Hayes D. (2008). Non problematic risks from low dose radiation induced DNA damage clusters. *Dose-Response*, n° 6, p. 30-52.
- ICRP (International Commission on Radiological Protection). (2007). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Ann ICRP 37*, publication 103, p. 2-4.
- ICRP Publication 65. (1993). Protection against radon 222 at home and at work. *Annals of the ICRP*, vol. 23, n° 1, Pergamon Press.
- INVS. (2012). *Surveillance épidémiologique à une échelle locale en santé environnement. Retours d'expérience, éléments pour sa mise en œuvre*. Rapport, mars.
- Kharetcha P, Hansen. (2013). Prevented Mortality and Greenhouse Gas Emissions from Historical and Projected Nuclear Power. *Environ Sci Technol*, n° 47, p. 4889-4895.
- Krestinina LY, Preston DL, Ostroumova EV *et al.* (2005). Protracted radiation exposure and cancer mortality in the Techa River Cohort. *Radiat Res*, n° 164(5), p. 602-11.
- Kreuzer M, Grosche B, Dufey F *et al.* (dir.). (2011). *Bundesamt für Strahlenschutz : Technical report. The German uranium miners cohort (Wismut cohort) 1946-2003*, Oberschleisheim.
- Krewski D, Jerrett M, Burnett RT *et al.* (2009). Extended follow-up and spatial analysis of the American Cancer Society study linking particulate air pollution and mortality. *Res Rep Health Eff Inst*, May, n° 140, p. 5-114; discussion 115-36.
- Laurier D, Jacob S, Bernier MO *et al.* (2008). 18 Epidemiological studies of leukaemia in children and young adults around nuclear 19 facilities: a critical review. *Rad Prot Dosim*, n° 132, p. 182-190.
- Le Guen B, Masse R. (2007). Effets des faibles doses des rayonnements ionisants. EMC - *Pathologie professionnelle et de l'environnement* : p. 1-13 [Article 16-510-A-10].
- Mancuso M, Pasquali E, Leonardi S *et al.* (2008). Oncogenic bystander radiation effects in Patched heterozygous mouse cerebellum. *PNAS*, n° 105, p. 12445-12450.
- Markandya A, Wilkinson P. (2007). Electricity generation and Health. *The Lancet*, n° 370, p. 979-990.
- Masse R. (2003). Le radon : aspects historiques et perception du risque. *Contrôle*, n° 153, p. 49-51.
- Land C. (1980). Estimating cancer risk from low doses of ionizing radiation. *Science*, n° 209, p. 1197-1203.
- Mathews JD, Forsythe AV, Brady Z, *et al.* (2013). Cancer risk in 680,000 people exposed to computed tomography scans in childhood or adolescence: data linkage study of 11 million Australians. *BMJ*, n° 346, f2360. doi: 10.1136/bmj.
- Metz-Flamant C. (2011). *Effets sanitaires des faibles doses à faibles débits de dose : Modélisation de la relation dose-réponse dans une cohorte de travailleurs du nucléaire*. Paris XI, 19 sept., 207 p.

- Muller W. (2010). Cell nucleus seeking OBT: a still neglected problem? In *Le Livre Blanc du tritium*. Autorité de Sûreté Nucléaire, Paris, p. 245-250.
- Nair RR, Rajan B, Akiba S, *et al.* (2009). Background radiation and cancer incidence in Kerala, India-Karanagappally cohort study. *Health Phys*, n° 96, p. 55-66.
- National Research Council, Committee on Health, Environmental, and Other External Costs and Benefits of Energy Production and Consumption. (2010). *Hidden costs of Energy; Unpriced Consequences of Energy Production and Use*. National Academies Press, Washington DC.
- National Research Council of the National Academies of USA (2006). *Health risk from exposure to low levels of ionizing radiation*. BEIR VII. The National Academies Press, Washington DC.
- Neumaier T, Swenson J, Pham J *et al.* (2012). Evidence for formation of DNA repair centers and dose-response nonlinearity in human cells. *PNAS*, Jan 10, n° 109, p. 443-448.
- Olipitz W, Wiktor-Brown D, Shuga J *et al.* (2012). Integrated molecular analysis indicates undetectable change in DNA damage in mice after continuous irradiation at ~ 400-fold natural background radiation. *Environ Health Perspect*, Aug, n° 120(8), p. 1130-1136.
- Ory C, Ugolin N, Hofman P *et al.* (2003). Comparison of transcriptomic signature of post-Chernobyl and post-radiotherapy thyroid tumors. *Thyroid*, Nov. n° 23(11), p. 1390-400. doi: 10.1089/thy.2012.0318. Epub 2013 Sep 19.
- Pearce MS, Salotti JA, Little MP *et al.* (2012). Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study. *Lancet*, n° 380, p. 499-505. doi: 10.1016/S0140-6736(12)60815-0. Epub 2012 Jun 7.
- Portess D, Bauer G, Hill M, O'Neil. (2007). Low-Dose Irradiation of Non-transformed Cells Stimulates the Selective Removal of Precancerous Cells via Intercellular Induction of Apoptosis. *Cancer Res*, n° 67(3), p. 1246-1253.
- Richter B. (2012). Opinion on «Worldwide health effects of the Fukushima Daiichi nuclear accident» by J. E. Ten Hoeve and M. Z. Jacobson, *Energy Environ Sci*, n° 5, doi: 10.1039/c2ee22019a.
- Rockwell T. (2006). *Testimony to the Nuclear Regulatory Commission's Advisory Committee on Nuclear Waste & Materials*, nov 15.
- Rothkamm K, Löbrich M. (2003). Evidence for a lack of DNA double-strand break repair in human cells exposed to very low x-ray doses. *PNAS*, n° 100, p. 5057-5062.
- Tao Z, Cha Y, Sun Q. (1999). Cancer mortality in high background radiation area of Yangjiang, China, 1979-1995. *Zhonghua Yi Xue Za Zhi*, n° 79(7), p. 487-92.
- Tubiana M, Feinendegen LE, Yang Ch, Kaminski JM. (2009). The linear no-threshold relationship is inconsistent with radiation biologic and experimental data. *Radiology*, n° 251, p. 13-22.
- Tubiana M, Masse R, de Vathaire F. *et al.* (2007). La controverse sur les effets de faibles doses de rayonnements ionisants et la relation linéaire sans seuil. *Radioprotection*, n° 42, p. 133-161.
- UNSCEAR. (2012). *Biological mechanisms of radiation actions at low doses. A white paper to guide the Scientific Committee's future programme of work*. United Nations, New York.
- UNSCEAR United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2000). *Sources, effects and risks of ionizing radiation. Report to the General Assembly. Annex G Biological effects at low radiation doses*. United Nations, New York.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). (2008-2011). *Sources, effects and risks of ionizing radiation. Report to the General Assembly, with Annexes*, United Nations, New York.
- WHO (2006). *Fuel for life: Household energy and Health*. WHO Press, Genève.
- Zablotska L, Bazyka D, Lubin J *et al.* (2013). Radiation and the risk of chronic leukemic and other leukemias among Chernobyl cleanup workers. *EHP*, n° 121, p. 59-65.

La précarité énergétique : quelles solutions ?

What solutions for energy insecurity?

Laure PIZAY¹

Résumé

Quelle que soit la définition adoptée pour la précarité énergétique, elle atteint de plus en plus de ménages en raison de l'augmentation du coût de l'énergie. En effet, seuls des travaux de rénovation et d'isolation des logements permettent de limiter la dépense énergétique, mais les dépenses nécessaires sont souvent au-delà des possibilités financières d'un grand nombre de ménages. Or le déficit de chauffage dans une maison n'est pas sans conséquences sanitaires difficiles à admettre dans une perspective d'équité. C'est pourquoi les pouvoirs publics en France se sont saisis de cette question et ont mis en place des aides qui essaient de limiter ce phénomène.

Abstract

Whatever is the definition adopted for the fuel poverty, it affects more and more households because of the increase of the energy cost. Indeed, only renovation and insulation of housing allows to limit the energy bill but the necessary cost for these house works is often beyond the financial possibilities of a large number of households. The deficit of heating in a house is not without sanitary consequences difficult to admit in a perspective of equity. That is why public authorities in France seized this question and give some aids which try to limit this phenomenon.

Mots-clés

Précarité énergétique, habitat et santé, aides publiques, modes de chauffage domestiques, facture énergétique.

Keywords

Fuel poverty, housing and health, public grants, domestic heating system, energetic bill.

Chaque mois, des millions de Français sont confrontés à des choix fondamentaux, comme choisir entre se chauffer convenablement ou réduire fortement le chauffage. Dans un cas, il s'agit de prendre le risque d'impayés, d'endettement progressif, voire de coupure d'énergie, et dans l'autre cas, subir les conséquences du froid pouvant se traduire par l'occurrence de maladies respiratoires, cardio-vasculaires, et par l'impossibilité d'accueillir ses proches chez soi par honte. Le seul palliatif maîtrisable financièrement pour continuer à se chauffer est l'utilisation d'un poêle à pétrole jugé très dangereux pour la santé des occupants. La solution préconisée par les experts consisterait à entreprendre des travaux pour améliorer la performance du logement : isoler les murs, la toiture, remplacer le système de chauff-

fage, alors que l'urgence impose de remplir le réfrigérateur d'ici la fin du mois. Quelles solutions peut-on apporter pour éviter d'être aspiré par ces spirales négatives ?

La précarité énergétique

Depuis 2010, en France, la loi Grenelle 2 donne la définition suivante : « Est en situation de précarité énergétique une personne qui éprouve des difficultés particulières à disposer de la fourniture d'énergie nécessaire à la satisfaction de ses besoins élémentaires en raison de l'inadaptation de ses ressources ou de ses conditions d'habitat ». Cette définition, volontairement floue, permet de tenir compte de l'autorestriction et de l'inconfort.

Caractéristiques des ménages déclarant souffrir du froid (14,8% des Français)	Caractéristiques des ménages ayant un Taux Effort Énergétique > 10% (18,1% des Français)
Soit 22% des ménages les plus pauvres (1 ^{er} quartile de revenus)	Soit 40,1% des ménages les plus pauvres (1 ^{er} quartile de revenus)
Locataires	Propriétaires
Moins de 50 ans	Plus de 65 ans
Logements avant 1975	Logements avant 1948
Résidents en agglomérations de + 200 000 habitants	Résidents en communes rurales

Figure 1

Profil de populations (Source : ENL 2006, INSEE/CSTB).

Populations profile

En Angleterre, cette notion date des années 90 : « Toute personne devant consacrer plus de 10 % de son revenu disponible au paiement de ses factures d'énergie est considérée en précarité énergétique ». C'est une définition quantitative qui ne tient pas compte de l'autorestriction, de l'inconfort, mais uniquement du coût de l'énergie dans le budget du ménage. Une personne qui ne se chauffe pas pour limiter ses dépenses ne sera pas considérée comme en précarité énergétique par cette définition.

Selon la définition de la précarité énergétique retenue, le profil des ménages diffère (figure 1).

Il est important de noter que les locataires bénéficient de peu de dispositifs publics pour faire évoluer leur situation énergétique puisqu'il incombe au propriétaire bailleur d'apporter une modification conséquente sur le bâti ou sur les équipements de chauffage/de production d'eau chaude. Au contraire, les propriétaires bailleurs ou occupants disposent d'un certain nombre de dispositifs publics qui peuvent les aider à mener des améliorations fondamentales dans leur logement. Cependant, il serait illusoire de penser que ces aides publiques peuvent, à elles seules, régler le phénomène de précarité énergétique.

Quelle est la part de l'énergie dans le budget des ménages ?

L'énergie représente en moyenne 21 % des dépenses liées au logement pour un locataire du parc social, contre 14 % pour un locataire du parc privé (figure 2).

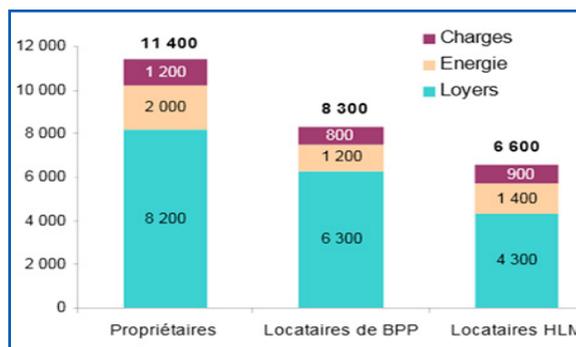


Figure 2

Dépenses courantes par logement (valeurs moyennes) en 2011. (BPP : Bailleurs Personnes Physiques). Euros/logt/an. (Source : Ceren et Compte du logement, 2011).

Mean values for running costs for one accommodation in 2011 (BPP: lessors physical persons).

Dans le parc social, le chauffage est souvent collectif donc comptabilisé dans les charges dont la part est d'autant plus importante que les loyers sont bas. Pour un propriétaire occupant, l'énergie représente en moyenne 17 % des dépenses liées au logement.

En 2006, les ménages les plus pauvres dépensaient pour l'énergie 15 % de leurs revenus (figure 3) contre 6 % pour les plus riches parce que les ménages les plus pauvres habitent dans des logements anciens, mal isolés, avec des équipements vétustes et surconsommateurs.

Entre 2001 et 2006, la part du budget consacrée à l'énergie a augmenté de presque 5 points, ce qui correspond à l'augmentation du coût de l'énergie et/ou à la diminution des ressources globales des ménages.

La consommation d'énergie varie selon la date de construction des logements

Plus de 2 logements anciens sur 3 (construits avant 1975) sont encore chauffés par des énergies fossiles (fioul ou gaz), alors que presque la moitié des logements récents (construits après 1975) utilisent l'électricité pour le chauffage (figure 4).

La performance énergétique des équipements, ainsi que leur entretien, participent à réduire ou à augmenter la facture énergétique. Si, dans l'ensemble, les appareils modernes ont des rendements acceptables (>80 %), ce n'est pas le cas des poêles anciens ni surtout des systèmes à feux ouverts (cheminées) dont le rendement est

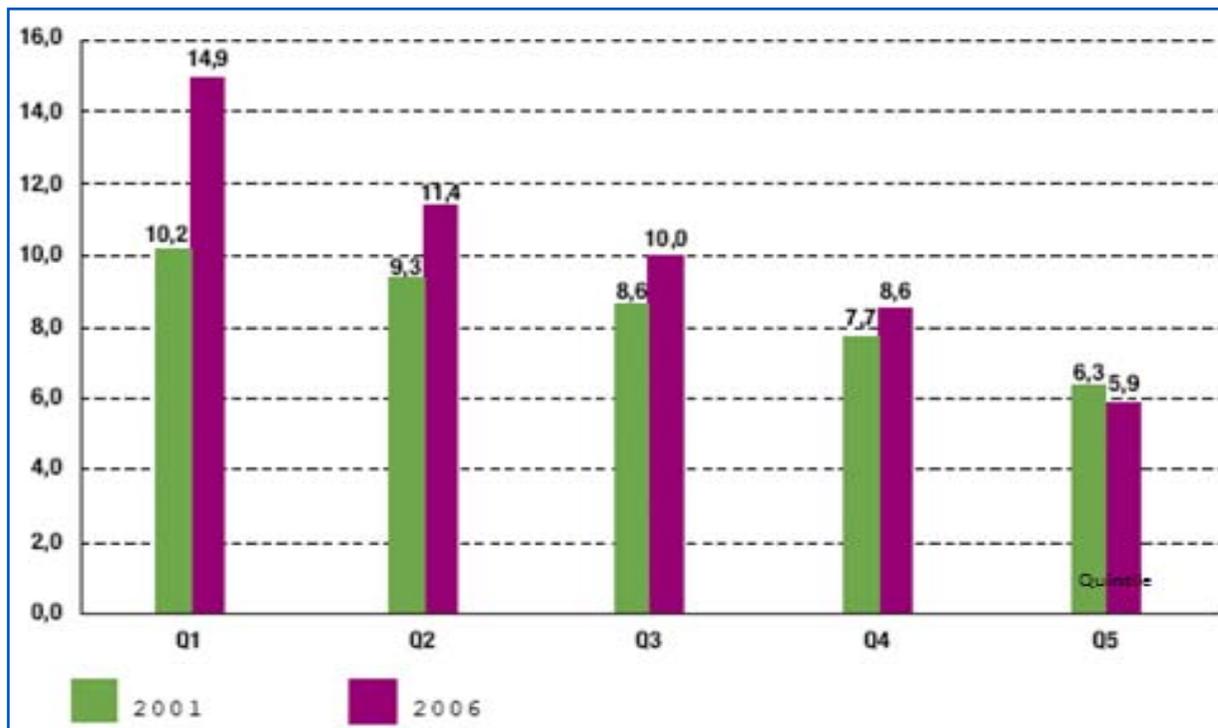


Figure 3

Évaluation en pourcentage de la part des dépenses énergétiques des ménages selon leur quintile de revenus en pourcentage du revenu brut. (Source : INSEE).

Les quintiles sont le découpage de toute la population en 5 tranches en fonction de leurs revenus. Q1 = les 20 % des revenus les plus faibles de la population française. Q5 = les 20 % des revenus les plus élevés.

Evaluation in percentage on the energy costs by home according to the quintile of income in percentage of the gross income.

Quintiles are the division of all the population in 5 classes according to their income. Q1 = The 20 % of the weakest income of the French population. Q5 = 20 % of the highest incomes.

si bas que le coût du chauffage se rapproche de celui obtenu avec des radiateurs électriques peu performants. Or un des recours pratiqué par les ménages modestes pour pallier l'insuffisance du chauffage consiste à installer des radiateurs électriques bon marché, car ils n'ont pas les moyens d'investir dans des appareils de chauffage modernes et performants. Ils achètent souvent ce qui est le moins cher ; un radiateur électrique bon marché de 2kW coûte de 20 à 30€ mais est extrêmement coûteux en énergie à l'usage. L'utilisation des poêles à pétrole est très fréquente ; si ces équipements ont l'avantage de permettre aux familles de maîtriser les dépenses énergétiques au jour le jour, ils peuvent engendrer d'importants risques sanitaires (lorsqu'un poêle à pétrole brûle 3 litres de carburant, il consomme la totalité de l'oxygène contenu dans une pièce de 12 m² ayant un plafond de 2,50 m), des risques liés à la sécurité (incendie), et, à l'usage, ils sont extrêmement onéreux.

Les facteurs de la précarité énergétique

Trois facteurs principaux et interdépendants déterminent la capacité des ménages à se fournir en énergie convenablement :

- la qualité du bâti, et des systèmes ;
- le coût de(s) l'énergie(s) utilisée(s) ;
- la situation économique et sociale du ménage.

Le processus de précarisation est un cercle vicieux (figure 5). La description suivante n'est pas universelle, mais représentative d'une certaine réalité : le ménage rencontre des difficultés économiques et ne parvient pas à honorer ses factures d'énergie. Dès lors, soit les ménages se retrouvent en impayé, soit ils réduisent drastiquement leurs consommations. À terme, un logement mal chauffé développe de l'humidité, ce qui augmente la sensation de froid, le mal-être dans le logement, et favorise l'apparition de moisissures, ce qui participe à la dégradation générale

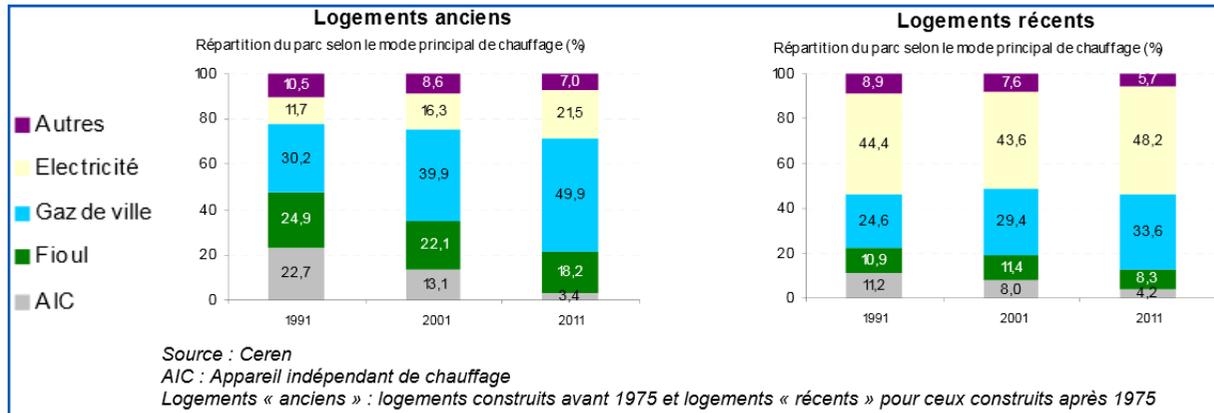


Figure 4

Répartition du parc suivant le mode de chauffage. (AIC : chauffage indépendant) (source : CEREN).
 Repartition of housing park follow heating system (AIC = independent heating).

du logement.

Si aucuns travaux ne sont faits, les ménages peuvent mettre en œuvre un certain nombre de stratégies pour se prémunir : calfeutrer les aérations pour empêcher le froid de rentrer, utiliser un chauffage d'appoint pour lequel il sera plus facile de contrôler la dépense, limiter ou couper complètement le chauffage... Ce qui augmente davantage encore l'humidité et peut provoquer le développement de pathologies physiques mais aussi psychologiques, voire des problèmes de sécurité dans le logement. Le froid, à lui seul, suscite un stress de la part de l'organisme, et peut être générateur de maladies.

Impact de la précarité énergétique sur la santé

Le lien entre précarité énergétique et santé reste difficile à établir, il a été peu étudié en France. Cependant, le CREAI-ORS a effectué récemment une étude : *Quand c'est le logement qui rend malade : étude sur les liens entre précarité énergétique et santé dans l'Hérault*² et *Étude sur les liens entre précarité énergétique et santé dans le Douaisis*³. Les principales conséquences de la précarité énergétique sur la santé des personnes sont des risques :

- sanitaires, conduisant à des pathologies diverses : bronchites – rhinites – céphalées – asthme – problèmes cardio-vasculaires... L'Organisation Mondiale de la Santé mentionne des surmortalités hivernales dues à des intoxications au monoxyde de carbone encore trop nombreuses en France.
- psychologiques, conduisant à un isolement social et familial, à un repli sur soi, et à des dépressions parfois liées aux factures impayées.

- sécuritaires : les chauffages d'appoint peuvent provoquer des risques d'intoxication au monoxyde de carbone et d'incendie. Christine Liddel⁴, reprendrait les chiffres avancés par Howden-Chapman⁵, en 2008 : « 1 € investi pour rendre un logement chauffable, c'est 0,42 € d'économie sur les dépenses de santé ».

Quelles solutions pour lutter contre la précarité énergétique ?

Les aides financières « ponctuelles »

Les institutions ont mis en place des aides financières destinées aux familles les plus précaires pour qu'elles puissent payer, ponctuellement, leurs factures d'énergie. Les fournisseurs d'énergie doivent, quant à eux, proposer des tarifs

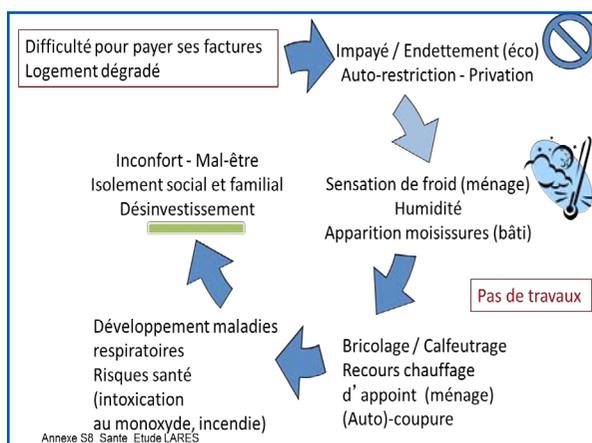


Figure 5

Étapes successives auxquelles peut être soumis un ménage en précarité énergétique.

Successive steps to which a household in fuel poverty can be submitted.

sociaux à leurs bénéficiaires, sous conditions de ressources :

- tarifs sociaux de l'énergie : TPN (Tarif Première Nécessité = électricité), délivré par EDF. TSS (Tarif Spécial de Solidarité), délivré par tous les fournisseurs de gaz.
- aide pour le logement APL à délivrée par la Caisse d'Allocations Familiales.
- Fonds de Solidarité Logement (FSL) à aide délivrée par les Conseils Généraux.
- aide des Centres Communaux d'Action Sociale (CCAS).

Si ces aides ont le mérite d'exister, elles restent ponctuelles et curatives. Elles ne proposent pas de solutions à long terme pour enrayer les causes de la précarité énergétique et améliorer durablement le confort des ménages dans leur logement.

Les aides pour financer la rénovation

Les politiques publiques en matière d'habitat ou d'énergie tentent de favoriser le passage à la rénovation du logement. Un certain nombre de dispositifs incitatifs ont été mis en place dans cette perspective ; ils sont destinés aux propriétaires (qu'ils soient bailleurs ou occupants) ; les locataires n'ont peu, voire pas de marge de manœuvre quant à des travaux qui toucheraient le bâti et les équipements, si ce n'est d'impliquer leur bailleur dans un projet de rénovation.

Chaque dispositif fait valoir un certain nombre de critères plus ou moins contraignants, ce qui, d'un point de vue, favorise des rénovations performantes, mais de l'autre complexifie les montages financiers et exclut une part des initiatives.

Pour l'analyse succincte qui est faite des dispositifs, nous nous plaçons du point de vue d'un ménage modeste, voire très modeste.

L'Éco-prêt à taux zéro (EcoPTZ)

Il s'agit là d'un prêt à taux d'intérêt nul. Sa particularité : il est impératif de faire un bouquet de travaux qui est souvent onéreux (combinaison d'au moins deux catégories de travaux). Par ailleurs, même s'il est présenté comme accessible sans conditions de ressources, les banques sont peu enclines à financer des ménages peu solvables.

Le Crédit d'Impôt Développement Durable (CIDD)

Le CIDD permet de déduire de l'impôt sur le revenu entre 10 % et 40 % des dépenses réalisées pour certains travaux d'amélioration de la performance énergétique du logement.

Pour avoir droit au CIDD, les travaux de rénovation doivent être conséquents et donc souvent onéreux. Par ailleurs, les ménages doivent faire l'avance des travaux, ce qui leur est souvent impossible financièrement.

La prime rénovation énergétique s'adresse exclusivement aux propriétaires occupants sous plafond de ressources. Cette aide prend la forme d'une prime, quel que soit le montant des travaux engagés entrant dans une certaine catégorie (cf. CIDD). Cette prime n'est pas cumulable avec les aides de l'ANAH que nous présentons ci-dessous et qui restent plus appropriées pour les ménages modestes.

L'exonération de la taxe foncière est un dispositif voté au niveau de la commune. Il permet de réduire le montant de la taxe foncière si des travaux d'amélioration de l'habitat ont été réalisés. L'avance des travaux reste à faire.

Aides destinées exclusivement aux ménages ayant des ressources modestes et très modestes

Le programme Habiter Mieux de l'Agence Nationale de l'Amélioration de l'Habitat (ANAH)

Ce programme est destiné à aider notamment les propriétaires (bailleurs ou occupants) à financer des travaux de rénovation dans leur logement. Pour être éligible, il est impératif de répondre à un certain nombre de critères dont l'amélioration de 25 % de la performance du logement, et ne pas dépasser un plafond de ressources annuelles. Pour bénéficier de l'aide, le propriétaire doit être, *a priori*, accompagné d'un opérateur spécialisé qui l'assiste tout au long de son projet.

Dans l'état actuel de la mise en place du programme Habiter Mieux qui est le programme phare de lutte contre la précarité énergétique, celui-ci ne devrait toucher que 7 % des ménages concernés par la précarité énergétique en 8 ans⁶.

Des organismes complémentaires comme les caisses de retraite, la Caisse d'Allocations Familiales, le Conseil Général, les fondations, les Centres Communaux d'Actions Sociales, les collectivités locales peuvent apporter un financement complémentaire pour les travaux de rénovation énergétique. Le micro-crédit social peut également être une source de financement. Cependant, chaque organisme impose ses propres critères d'éligibilité et ses propres conditions qui rentrent parfois en conflit les uns avec les autres.

Il est extrêmement complexe d'avoir une vue d'ensemble de ces aides et de pouvoir les lister de manière exhaustive. Les recherches de financement doivent être menées au cas par cas des dossiers traités, ce qui suppose un important travail d'ingénierie pour chaque projet.

Des points importants

Du point de vue du bénéficiaire, les démarches à entreprendre pour connaître l'ensemble des financements disponibles pour des travaux de rénovation de son logement ressemblent au parcours du combattant. Le nombre d'acteurs, de dispositifs mobilisables et de critères d'éligibilité participe à complexifier le montage de dossier de travaux de rénovation et aboutit dans beaucoup trop de cas à l'abandon du projet.

Il est urgent de mettre en cohérence l'ensemble des politiques publiques de l'habitat et de mettre en place un véritable « Service public de la performance énergétique de l'habitat⁷ ». Les réponses qui peuvent être apportées pour lutter contre la précarité énergétique doivent être de plusieurs ordres :

- financier : il est impératif de clarifier et d'harmoniser les aides financières à la rénovation. La création d'un fonds de lutte contre la précarité énergétique permettrait de faciliter le montage financier et rendre lisible l'ensemble des dispositifs et aides existants pour les professionnels et les bénéficiaires. Ceci suppose donc d'harmoniser les critères d'éligibilité des bénéficiaires et des travaux finançables.
- accompagnement sociotechnique des ménages : accompagner les ménages en pré-

carité énergétique semble être une des pierres angulaires pour lutter efficacement contre la précarité énergétique. Pour être opérationnel, cet accompagnement doit se faire au plus près des besoins de chacun et répondre à l'ensemble des problématiques rencontrées.

Un seul acteur ne peut être compétent face à la multitude des situations (conjugaison de problématiques énergétiques, économiques et sociales). C'est donc collectivement, en unissant les forces et compétences des différents acteurs locaux qu'un travail efficace pourra être mené auprès des ménages. Aujourd'hui, ces compétences existent mais ne communiquent pas de manière transversale. La création de « maisons locales de l'habitat » peut être une réponse : elle consisterait à accueillir en leur sein les différents acteurs compétents (acteurs sociaux, acteurs habilités sur les aides financières ou la médiation bailleurs/locataires (l'Agence Nationale de l'Amélioration de l'Habitat, l'Agence Départementale d'Information sur le Logement), acteurs sociotechniques (association de maîtrise de l'énergie, Espaces InfoàÉnergie...), acteurs de la rénovation (acteurs de l'autoréhabilitation, opérateurs spécialisés...)). Le principe fondamental de cette maison de l'habitat serait d'avoir, pour le ménage, un interlocuteur unique, et que les compétences spécifiques nécessaires à la réalisation de chaque projet soient structurées et mobilisées en interne *via* un dossier unique.

Faire évoluer le cadre réglementaire pour le parc locatif et mettre en œuvre des mesures coercitives permettraient d'inciter les bailleurs à rénover davantage leurs logements.

Conclusion

La précarité énergétique est un phénomène qui risque de prendre de l'ampleur et de toucher les classes moyennes en raison de l'augmentation du coût de l'énergie. Il s'agit d'un véritable défi que la France doit relever dans le cadre de la transition énergétique.

1. Écopole Énergie, Gardanne, laure.pizay@ecopolenergie.com

2. CREA-ORS LR. (2013). *Quand c'est le logement qui rend malade : étude sur les liens entre précarité énergétique et santé dans l'Hérault*, 69 p.

3. CREAI-ORS-LR – PACT Douaisis. (2013). *Étude sur les liens entre précarité énergétique et santé dans le Douaisis*, 63 p.
4. Séminaire Epee du 8 octobre 2009. <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?id=63198&p1=1&ref=17205>
5. Telfar-Barnard L, Baker M., Hales S., Howden-Chapman P. (2008). Excess winter morbidity and mortality: still a lack of evidence that housing or socio-economic status makes much difference. *Rev Environmental Health*, n° 23 (3), p. 203-221.
6. Manifeste 2012 « En finir avec la précarité énergétique ».
7. Manifeste 2012 « En finir avec la précarité énergétique ».

L'ASSOCIATION ÉCOPOLÉNERGIE

Depuis de nombreuses années, l'association Écopolénergie, basée à Gardanne, participe à son niveau à la lutte contre la précarité énergétique. Elle développe ses actions auprès de différents publics et lance de nombreuses expérimentations pour tenter d'apporter des réponses en termes de dispositifs adéquats selon les situations.

Actions vis-à-vis des locataires du parc social :

Écopolénergie a développé une méthodologie d'accompagnement des locataires du parc social lors de rénovations énergétiques (prise en main des nouveaux équipements, maîtrise des consommations, pose de kits économes), accompagnement du bailleur (évaluation des consommations lors de réhabilitation, analyse du contrat de chauffe, formation des agents) et des acteurs locaux (formation, mise en relation).

Actions vis-à-vis des ménages du parc privé :

Écopolénergie réalise des visites à domicile chez les particuliers. L'objectif : identifier les principales causes des difficultés liées à l'énergie dans le logement, détecter avec le ménage des pistes de réduction de la consommation énergétique, orienter les familles vers les dispositifs et les acteurs adéquats.

Accompagnement des collectivités :

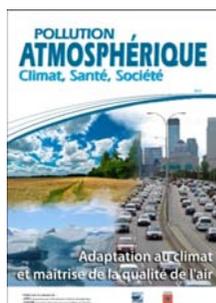
Écopolénergie accompagne les collectivités à la mise en œuvre de politique de lutte contre la précarité énergétique. À travers des diagnostics de territoire et l'analyse des dispositifs, l'association propose en concertation avec les acteurs des pistes d'amélioration des programmes.

Par ailleurs, Écopolénergie coanime le Réseau Régional Énergie et Précarité (RREP) en région PACA. Cet outil a pour but de fédérer et rassembler les acteurs qui œuvrent dans le domaine de la précarité énergétique de manière à agir globalement, de manière cohérente, et mutualiser les expériences de chacun.

REVUE POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

Climat, Santé, Société

La revue est désormais au format numérique



Depuis 2013, la revue est en accès libre sur le site de l'INIST :

-> <http://irevues.inist.fr/pollution-atmospherique/>

Et sur celui de l'APPA (Association pour la Prévention de la Pollution Atmosphérique) -> www.appa.asso.fr

Pour suivre nos prochaines parutions, inscrivez-vous à la newsletter en nous communiquant votre mail à cette adresse : revuepa@appa.asso.fr

Le prochain numéro en ligne prévu aura pour thème principal :
L'histoire de la pollution atmosphérique



Grâce à son conseil scientifique et à son comité de rédaction, la revue conserve son indépendance et sa validation scientifique.

Les numéros spéciaux demeurent au format papier et sont vendus à l'unité

Le précédent numéro paru en août 2013 :

Adaptation au climat et maîtrise de la qualité de l'air



Réchauffement climatique et perception des sources d'énergie

Climate warming and perception of energy resources

Daniel BOY
(CEVIPOF)

Résumé

En s'appuyant sur divers travaux d'enquête, l'objectif de cette présentation est de dégager des éléments concernant les représentations du changement climatique dont la relation avec l'utilisation quotidienne d'énergie n'est pas toujours évidente. Dans le domaine plus précis de la consommation énergétique, un certain nombre d'enquêtes permettent de préciser l'attrait des énergies renouvelables et les relations entre l'électricité nucléaire et la société. Les revues annuelles effectuées par l'ADEME depuis plus d'une dizaine d'années offrent une vision de l'évolution de la perception du changement climatique au fil des ans et des événements politiques qui ont influencé cette perception. L'interprétation des résultats montre la sensibilité de cette perception aux événements et particulièrement aux aléas de la politique. Le mirage des énergies renouvelables tend à s'estomper en raison des nombreux débats en cours. L'adhésion de l'opinion publique française au nucléaire est nette puisque, même après la catastrophe de Fukushima, les enquêtés restent majoritairement favorables à cette source d'énergie pourtant contestée, y compris par des personnes ayant un niveau d'études scientifiques élevé. Néanmoins, la question énergétique, et en particulier celle de l'énergie nucléaire, s'est fortement politisée.

Mots-clés

Perception du changement climatique, opinion publique française, énergies renouvelables, énergie nucléaire.

Abstract

Drawing from a set of surveys, the aim of the present paper is to identify elements concerning the representations of climate change, the relation of which with daily energy use is not always clear. More precisely, in the field of energy consumption, several surveys allow a more precise vision of the interest for renewable energies and of the relationship between nuclear energy and society. The annual surveys carried out for more than ten years by ADEME (environment and energy mastering agency) allow a diachronic view of the evolution of climate change perception and of political events which have influenced it. The interpretation of the results points out the sensitivity of climate change perception to events, and particularly to political hazards. The renewable energies mirage has tended to fade with the numerous current debates. The adhesion of French public opinion to nuclear energy remains significant as, even after the Fukushima accident, a majority of individuals investigated are in favor of this still contested source of energy, including by people with high scientific literacy. Nevertheless, the energy issue, and particularly when it comes to nuclear energy, has become strongly politicized.

Keywords

Perception of climate change, French public opinion, renewable energies, nuclear energy.

Les problèmes énergétiques sont peu appréhendés sous l'angle d'une grille de lecture sanitaire. Cependant, la question des pollutions et des risques, fortement liée à la question énergétique, est très souvent présentée en fonction d'inquiétudes concernant la santé.

Interroger l'opinion publique sur les questions énergétiques a du sens dans la mesure où la question de la production et de la composition du « mix » énergétique est pilotée par la demande finale de l'utilisateur mais aussi par l'acceptation par les riverains des unités de production. La santé n'est pas au cœur des questions posées, mais il est possible de supposer qu'en raison du lien entre la production énergétique et l'environnement, la santé ne soit pas complètement absente des préoccupations exprimées à travers les sondages présentés. En revanche, les bénéfices sanitaires apportés par l'offre énergétique ne sont pas appréhendés par ces sondages. L'analyse des résultats d'un certain nombre d'enquêtes permet d'aborder quatre questions :

- la perception du réchauffement climatique par le grand public
- le problème du coût/bénéfice des énergies
- la séduction des énergies renouvelables
- les rapports entre nucléaire et société

1. La question du réchauffement climatique : connaissances et attitudes du public

La question du réchauffement climatique fait l'objet de revues effectuées annuellement, pour l'ADEME, au mois de juin depuis l'année 2000. Un certain nombre de questions sont répétées de manière identique chaque année, ce qui n'interdit pas, parfois, l'introduction de questions nouvelles. Ces enquêtes annuelles sont uniques en Europe ; elles permettent de voir comment le problème du changement climatique est perçu, mais aussi comment les représentations sociales que le public en a ont évolué depuis plus de 10 ans. Les perceptions du public sont-elles plus précises et mieux documentées ? Quels sont les événements qui peuvent les influencer ?

Cette revue est effectuée par téléphone, auprès de 1 000 personnes âgées de plus de 15 ans, selon la méthode des quotas. La dernière vague a été réalisée en juin 2013. Le question-

naire comporte à la fois des questions fermées mais aussi une question ouverte, reprise chaque année : « En quoi consiste, selon vous, l'effet de serre ? ». Cette formulation permet de collecter les réponses énoncées dans les propres mots de l'enquêté. On collecte ainsi 1 000 réponses classées en catégories qui présentent l'avantage de constituer des représentations spontanées et non organisées par une question.

L'examen des résultats a permis de recenser l'occurrence éventuelle du mot santé ou maladie dans l'énoncé des réponses sur ce qu'est l'effet de serre. Une vingtaine de réponses contenant des références à la santé (ça va nuire à la santé...) ou à la maladie ont été recueillies en 2012 et 2013. Ce résultat montre combien l'association directe entre l'effet de serre et la santé est faible puisque seulement 2 % des enquêtés y font allusion.

Quelles sont les autres réponses avancées ?

Un premier type de réponse est : l'effet de serre, c'est la pollution et les déchets ; la deuxième réponse fait référence à la couche d'ozone : il y a un trou dans la couche d'ozone qui laisse passer plus de soleil, qui réchauffe ; la troisième incrimine le CO₂ ou un autre gaz ; une autre réponse, un peu tautologique, est : l'effet de serre, c'est la chaleur, sans explication (16 %). Les autres réponses, non spécifiées, totalisent 3 %. Une réponse qui apparaît chaque année est celle de l'étouffement : « l'effet de serre, on étouffe » ; l'occurrence de cette réponse s'élève à 1 %, mais elle est récurrente (tableau 1).

Dans la première enquête (2000), 30 % des personnes interrogées ne savaient pas de quoi il était question, alors qu'en 2012, seuls 15 % des enquêtés ne connaissent pas l'effet de serre. En revanche, sur le phénomène lui-même, la connaissance ne s'est pas beaucoup améliorée puisque seulement 14 % des personnes interrogées attribuent l'effet de serre à la présence du CO₂ (tout autre gaz invoqué est considéré comme une bonne réponse).

Parmi les enquêtés ayant un niveau d'études primaire (tableau 2), la réponse la plus fréquente attribue l'effet de serre à la pollution. Aux niveaux Bac et Bac + 2 est privilégiée la réponse « ozone ». C'est seulement parmi les enquêtés qui ont un niveau d'études élevé et qui ont suivi des études scientifiques qu'on obtient le taux le plus élevé de réponses correctes. Néanmoins, 16 % de ces personnes dites « scienti-

Intitulé de la catégorie :	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
La pollution, les déchets	11	15	18	24	21	25	24	23	24	20	20	28	28
Couche d'ozone	19	15	27	22	24	25	26	24	25	23	21	22	23
Des gaz, le CO ₂	12	14	10	13	13	14	12	17	17	17	16	14	14
Chaleur, réchauffement	22	25	21	18	16	13	18	18	16	21	17	18	16
Autres réponses	5	3	4	3	5	3	4	3	3	5	6	3	3
Le manque d'air	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1
Sans réponse	30	27	19	19	20	19	14	13	13	12	19	14	15

Tableau 1

En quoi consiste selon vous l'effet de serre ? (Résultats du codage de la question ouverte).

[What is greenhouse effect ? \(Coding results of the open question\).](#)

riques » attribuent le réchauffement climatique à la couche d'ozone ! On discerne cependant une relation entre le niveau d'études et la justesse des réponses.

Le fait d'attribuer le réchauffement climatique à la pollution peut regrouper deux types de répondants : ceux qui effectivement pensent aux gaz, que ce soient des GES ou des gaz toxiques, sans savoir les nommer, mais aussi ceux qui mettent probablement sous le terme de pollution les industries et les phénomènes de combustion. De même, selon certains, les centrales nucléaires contribuent à l'effet de serre car leur panache formé par de la vapeur d'eau est censé réchauffer l'atmosphère. La réponse associant l'effet de

serre à la chaleur est plus difficile à interpréter, elle peut résulter de l'association précédente entre effet de serre et combustion.

Quelle est la place du changement climatique au sein des phénomènes d'environnement ?

Le classement est établi en fonction du pourcentage de premières réponses (tableau 3). Cette question a été posée à partir de 2005. En 2007, 33 % des enquêtés accordent une forte importance au changement climatique, contre 21 % l'année précédente. En 2006, le film d'Al Gore *Une vérité qui dérange* a sûrement contribué à inscrire davantage la préoccupation sur le changement climatique dans les esprits.

Les réponses par catégories (cf. tableau 1)	Pollution	Ozone	Gaz, Co ₂	chaleur	SR
Sans études, primaire	31	15	2	14	35
Intermédiaire	33	21	8	15	19
Bac	28	25	13	23	6
Bac + 2	28	29	15	16	8
Universitaire	19	21	29	21	3
Scientifique	13	16	44	19	3
ENSEMBLE	28	22	14	18	12

Tableau 2

Réponses à la question « En quoi consiste selon vous l'effet de serre », selon le niveau d'études.

[Answers to the question « what does the green house effect consist of », depending on the education level.](#)

(% première réponse)	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Le réchauffement climatique	19	21	33	29	28	19	15	17
La lutte contre la pollution de l'air	21	21	21	17	15	16	15	18
La pollution de l'eau	23	20	18	20	19	23	21	22
Les déchets ménagers	8	9	8	9	7	9	8	9
La dégradation de la faune et de la flore	11	9	8	9	11	13	14	14
Les risques du nucléaire	10	13	7	9	12	11	21	13
Le bruit	5	5	3	5	5	6	3	3
La dégradation des paysages	2	2	2	2	3	3	3	5

Tableau 3

Je vais vous citer un certain nombre de problèmes d'environnement. Quels sont les deux qui vous semblent les plus préoccupants ?

I am going to list you a series of environmental issues. What are the two which you consider the most preoccupating?

Par la suite, la même année, le contexte des élections présidentielles a été marqué par une dynamique importante des associations environnementales et par le Grenelle de l'environnement. Le score de 33 % en 2007 prouve que le changement climatique est sensible à la politique. En 2010, avec l'échec de la conférence de Copenhague, le « Flopenhague », conjugué avec la polémique alimentée par Allègre et les climato-sceptiques, la question du réchauffement climatique n'est plus classée au premier rang que par 15 % des enquêtés. Les années suivantes, le score remonte un peu, ce qui prouve une résilience faible mais certaine des opinions sur cette question.

En 2011, Fukushima a réactivé la peur du nucléaire, classée en tête des préoccupations environnementales par 21 % des enquêtés ; ce

score baisse sensiblement l'année suivante, ce qui marque la persistance forte en France des opinions en faveur du nucléaire.

Que ce soit pour le nucléaire ou pour le changement climatique, l'opinion sur ces questions est très volatile. Les aléas de la politique et des événements contribuent fortement à influencer les réactions du public.

L'origine anthropique ou naturelle du réchauffement climatique est une question classique dans les sondages. Les résultats montrent l'importance de l'impact de la conférence de Copenhague et de tout le courant climato-sceptique (tableau 4). En 2009, 81 % des réponses associent le réchauffement climatique aux activités humaines.

	2009	2010	2011	2012
Le réchauffement de la planète est causé par les activités humaines	81	65	68	72
Il s'agit d'un phénomène naturel qui a toujours existé	17	30	27	25
SR	2	4	5	3

Tableau 4

La plupart des scientifiques pensent que le réchauffement de la planète est causé par les activités humaines, mais certains scientifiques pensent au contraire qu'il s'agit d'un phénomène naturel qui a toujours existé. Vous-même, qu'en pensez-vous ?

Most scientists think that global warming is caused by human activities, but, on the contrary, some think that it is a natural phenomenon which has always existed. What is your opinion?

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Les conditions de vie deviendront extrêmement pénibles à cause des dérèglements climatiques	60	61	54	59	51	52	57
Il y aura des modifications de climat mais on s'y adaptera sans trop de mal	34	34	40	35	41	41	36
Le réchauffement aura des effets positifs pour l'agriculture et les loisirs	3	4	4	4	5	5	4
Sans réponse	2	2	2	1	3	2	3
Total	100	100	100	100	100	100	100

Tableau 5

Si le réchauffement climatique continue, à votre avis, quelles seront les conséquences en France d'ici une cinquantaine d'années ?

If climate warming goes on, what, in your opinion, will the consequences be in fifty years?

En 2010, le score baisse considérablement pour atteindre 65 %, tandis que plus d'un tiers des enquêtés opte pour la réponse qui attribue le réchauffement climatique à des phénomènes naturels. En dépit d'une certaine résilience, l'opinion est fortement influencée par « l'effet Copenhague », marqué à la fois par l'échec de la conférence et par l'émergence d'un courant scientifique plus sceptique.

Quelles sont les conséquences, en France, du réchauffement climatique ?

Un tiers des enquêtés pense qu'on peut s'adapter au changement climatique, un peu moins des deux tiers pensent que la vie sera très pénible, tandis que 4 % identifient des effets positifs (ce sont surtout des agriculteurs) (tableau 5).

	2001	2002	2003	2004
Le risque d'une instabilité de plus en plus grande du climat	76	81	81	77
Le risque de vagues de canicules plus nombreuses	57	70	75	74
Le risque de tempêtes	71	70	65	64
Le risque d'apparition de nouvelles maladies tropicales	55	49	53	55
Le risque d'inondations	55	55	53	51
Le risque d'hivers plus rigoureux	35	42	40	45

Tableau 6

Certains disent que le réchauffement de la terre pourrait entraîner des risques pour les humains. Dites-moi si là où vous habitez ce risque sera à l'avenir très important, assez important, assez peu important, pas important du tout.

Some say that earth warming could lead to risks for humans. Tell me if, where you live, this risk will be, in the future, very important, rather important, rather not important, not at all important.

	Le risque d'une instabilité de plus en plus grande du climat	Le risque de vagues de canicules plus nombreuses	Le risque de tempêtes	Le risque d'apparition de nouvelles maladies tropicales	Le risque d'inondations	Le risque d'hivers plus rigoureux
Pas d'études, Primaire	72	73	64	69	49	44
Intermédiaire	76	75	62	57	49	48
Bac	83	79	72	53	51	44
Bac + 2	83	77	63	50	53	51
Universitaire	75	69	56	43	53	40
ENSEMBLE	77	74	63	55	51	45

Tableau 7

Les conséquences du réchauffement climatique selon le niveau culturel.

The consequences of climate warming according to the cultural level.

La question sur les risques n'est pas posée chaque année. Parmi les risques, celui de l'apparition de maladies tropicales est mentionné par 50 % des enquêtés dans une question fermée (tableau 6). Néanmoins, l'inquiétude sanitaire est plus faible que celle ressentie à propos de l'instabilité du climat.

Le tableau 7 montre que les personnes ayant un niveau d'études élevé font un peu moins le lien entre le réchauffement climatique et l'occurrence de phénomènes météorologiques extrêmes. Mais, en dépit des mises en garde des scientifiques, les individus établissent fréquemment un lien entre les canicules, les tempêtes et le changement climatique. Selon une certaine logique, le réchauffement climatique, associé à une forte

instabilité du climat, est assimilé au risque lié aux canicules, car les effets de l'été 2003 sont encore présents dans les esprits. La perception du risque lié à l'occurrence de maladies tropicales est inversement proportionnelle au niveau d'étude : 43 % des diplômés de haut niveau le craignent contre plus de 69 % des enquêtés n'ayant pas fait d'études.

Les solutions présentées pour lutter contre l'augmentation de l'effet de serre sont classiques. Le progrès technique ne présente une solution considérée comme vraisemblable que pour une minorité (tableau 8). Entre 50 et 60 % des enquêtés pensent qu'il faudra modifier les modes de vie, mais ces réponses ne signifient pas un engagement de leur part ni l'énoncé de solutions (en

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Le progrès technique permettra de trouver des solutions pour empêcher l'augmentation de l'effet de serre	14	8	9	10	12	11	11
Il faudra modifier de façon importante nos modes de vie pour empêcher l'augmentation de l'effet de serre	54	61	59	61	52	56	50
C'est aux États de réglementer, au niveau mondial, l'augmentation de l'effet de serre	25	24	20	18	20	19	23
Il n'y a rien à faire, le réchauffement de l'atmosphère est inévitable	7	7	12	10	15	13	15
Sans réponse	0	0	0	1	1	1	1

Tableau 8

De ces trois/quatre opinions, laquelle se rapproche le plus de la vôtre ?

Among these three/four opinions, which one is closest to yours?

légère diminution). Un quart des enquêtés pense qu'il appartient aux États de développer une réglementation au niveau mondial. Le sentiment d'impuissance augmente entre 2006 et 2012, son score passe de 7 à 15 % ; certes, ce taux est faible mais la tendance est tout de même sensible et révèle une passivité et une résignation qui ont tendance à s'accroître.

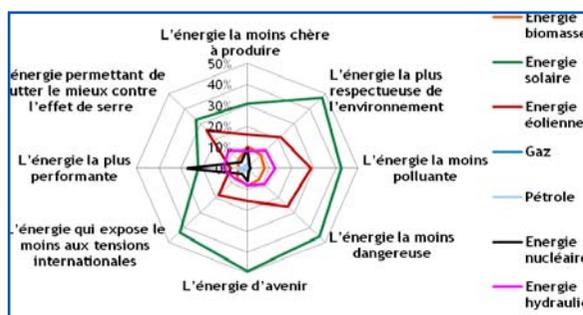


Figure 1

Présentation des réponses à la question suivante : « Parmi les énergies que je vais vous citer, quelle est celle qui correspond le mieux à chacune des qualités suivantes ? » (Enquête BVA « Énergies renouvelables » 2011).

Presentation of the answers to the following question: « Among the energies that I am going to list you, what is the one which fits the best with each of the following qualities (BVA « Renewable energies » enquiry 2011).

2. La perception des coûts/bénéfices des différentes énergies

Il n'y a pas beaucoup d'enquêtes précises sur ce sujet, mais l'ADEME effectue chaque année un sondage sur la qualité affectée aux différentes énergies.

L'énergie solaire, représentée par un cercle vert, est dotée de toutes les qualités (figure 1).

L'énergie nucléaire présente comme seule qualité sa haute performance, car le système a fait ses preuves. La différence entre le nombre de qualités affectées au nucléaire par rapport à celles qui sont attribuées au solaire est impressionnante, surtout au regard du pourcentage d'énergie fournie par ces deux sources.

3. Les ENR (Énergies Naturelles Renouvelables) exercent une forte séduction sur l'opinion

Cet effet de séduction s'explique vraisemblablement par leur caractère propre, leur système de production simple et leur financement abordable. Cette constatation repose sur le résultat des enquêtes sur la perception de la science et de la technique : sept enquêtes ont eu lieu en

	Rappel Enquête 2007	Décembre 2011	Évolution 2007-2011
Oui, certainement	20	9	-11
Oui, probablement	33	24	-9
Total oui	53	33	-20
Non, probablement pas	27	35	+8
Non, certainement pas	14	29	+15
Total non	41	64	+23
Sans opinion	6	3	-3
	100%	100%	

Tableau 9

Pensez-vous qu'il sera possible dans dix ans en France de produire quasiment toute l'électricité nécessaire au pays à l'aide d'énergies renouvelables ?

Do you think that in ten years time, it will be possible to produce all the electricity necessary for the country with renewable energies?

	Oui, certainement	Oui, probablement	TOTAL OUI	Non, probablement pas	Non, certainement pas	SR	
Homme	9%	19%	28%	32%	39%	2%	100%
Femme	9%	28%	37%	38%	20%	5%	100%
	9%	24%	33%	35%	29%	4%	100%

	Oui, certainement	Oui, probablement	TOTAL OUI	Non, probablement pas	Non, certainement pas	SR	
18 à 24 ans	9%	36%	45%	33%	19%	4%	100%
25 à 34 ans	13%	34%	47%	35%	16%	2%	100%
35 à 49 ans	12%	21%	34%	37%	28%	2%	100%
50 à 64 ans	6%	20%	26%	36%	35%	3%	100%
65 ans et+	6%	18%	23%	32%	37%	7%	100%
	9%	24%	33%	35%	29%	4%	100%

Intérêt pour la science	Oui, certainement	Oui, probablement	TOTAL OUI	Non, probablement pas	Non, certainement pas	SR	
Beaucoup	9%	20%	28%	26%	43%	3%	100%
Assez	8%	23%	30%	34%	32%	3%	100%
Peu	9%	23%	32%	41%	24%	3%	100%
Pas du tout	14%	36%	50%	30%	15%	6%	100%
	9%	24%	33%	35%	29%	4%	100%

Tableau 10

Pensez-vous qu'il sera possible dans dix ans en France de produire quasiment toute l'électricité nécessaire au pays à l'aide d'énergies renouvelables ? (2011) selon le genre, l'âge et le degré d'intérêt pour la science.

[Do you think that in ten years time in France it will be possible to produce all the electricity necessary for the country with renewable energies? \(2011\), according to gender, age and interest for science.](#)

France depuis 2007. En 2007, 53 % des personnes pensaient que toutes les énergies produites en France pourraient être renouvelables (tableau 9).

En 2011, seules 33 % des personnes en étaient convaincues. Ce retrait de 20 points montre l'efficacité des débats et de l'information qui ont permis au public de se forger une opinion plus raisonnable. Les représentations de l'avenir des énergies renouvelables sont différentes en fonction du genre (37 % des femmes estiment certaine ou probable une part très importante des énergies renouvelables dans la production d'électricité, contre 28 % des hommes) ainsi

que de l'âge (tableau 10). On est plus optimiste quand on est jeune et plus favorable à l'expansion de la modernité. Ces différences sont tout à fait significatives : 45 % des 18-24 ans pensent que les énergies renouvelables pourront être la seule source d'énergie contre 23 % des plus de 65 ans. Ce point de vue est aussi différencié selon le degré d'intérêt pour la science, formulation assez vague qui indique un goût pour les questions scientifiques. 50 % de ceux qui disent ne pas s'intéresser à la science pensent que le tout renouvelable est possible. Ces attitudes sont vraisemblablement en partie liées au *background* culturel et au niveau d'accès à l'information scientifique.



1 Vraiment contre	12	18	18	16
2	12	15	14	18
3	13	21	23	25
4	28	21	25	25
5	17	16	12	8
6 Vraiment pour	11	6	5	4
SR	7	3	3	4
	100 %	100 %	100 %	100 %

	Rappel enquête 1982	Rappel enquête 1989	Rappel enquête 1994	Décembre 2011
Total Contre	37	54	55	59
Total Pour	56	43	42	37

Tableau 11

D'après leur opinion sur le développement des centrales nucléaires, on classe les Français sur une échelle de ce genre. Comme vous voyez, il y a deux grands groupes : ceux qui sont contre et ceux qui sont pour. On peut être plus ou moins pour ou plus ou moins contre. Vous-même, où vous situeriez-vous sur cette échelle ?

Regarding their opinion concerning the development of nuclear plants, French are classified on a scale of this type. As you see, there are two main groups, those that are against it and those that are in favor of it. One can be more or less against it or in favor of it. Where do you place yourself on this scale?

Ce même scepticisme vis-à-vis des énergies renouvelables et de leur aptitude à supplanter toute autre source d'énergie se décline également selon le niveau d'étude ; un quart des individus ayant suivi des études scientifiques pense que l'avenir est en faveur des renouvelables, mais

45 % de cette même catégorie estiment le contraire. Ce score peut être rapproché de celui de 43 % (tableau 10) qui s'intéressent à la science mais ne croient pas à l'avenir hégémonique des énergies renouvelables.

	Rappel enquête 2000	Rappel enquête 2007	Décembre 2011	Évolution 2007 - 2011
Ne pas remplacer ces centrales et abandonner peu à peu cette énergie	53	49	56	+7
Remplacer au fur et à mesure les anciennes centrales nucléaires par de nouvelles situées au même endroit	39	46	36	-10
SR	8	5	8	+3
	100 %	100 %	100 %	

Tableau 12

À propos de l'énergie, on pense aujourd'hui à deux solutions, laquelle aurait votre préférence ?

As far as energy is concerned, two solutions are considered today. Which one do you prefer?

4. Nucléaire et société

De nombreuses études ont été conduites sur ce sujet, en particulier par l'IRSN (Institut de Recherche et de Sécurité Nucléaire) qui publie chaque année un baromètre¹ indiquant les fluctuations de l'opinion publique à ce sujet. De manière classique, les individus sont classés sur une échelle pour ou contre. C'est ce qui a été fait en 1982, 1989, 1994, 2011. La plupart des enquêtés sont modérément contre, mais la proportion des individus qui prennent position contre le nucléaire est de plus en plus importante (tableau 11).

56 % des enquêtés approuvent le nucléaire en 1982, puis ces chiffres s'érodent. On constate l'effet de l'accident de Tchernobyl, puis de celui de Fukushima. Les résultats de l'IRSN montrent que 11 mois après ce dernier accident, la confiance vis-à-vis du nucléaire a remonté.

Vous y êtes favorable	21
Vous êtes hésitant	41
Vous y êtes opposé	26
Vous n'avez pas vraiment d'opinion sur le sujet	12
Sans opinion	0
	100 %

Tableau 13

Personnellement, quelle est votre opinion sur le recours à l'énergie nucléaire en France ?

What is your personal opinion about resorting to nuclear energy in France?

	Vous y êtes favorable	Vous êtes hésitant	Vous y êtes opposé	Vous n'avez pas vraiment d'opinion sur le sujet
Très bien informé	48%	13%	35%	3%
Plutôt bien informé	45%	34%	13%	7%
Plutôt mal informé	15%	46%	27%	11%
Très mal informé	5%	40%	37%	18%

Tableau 15

Attitudes à l'égard de l'énergie nucléaire selon le degré d'information.
Attitudes concerning nuclear energy according to the information level.

Très bien informé	3
Plutôt bien informé	24
Total bien informé	27
Plutôt mal informé	51
Très mal informé	21
Total mal informé	72
SR	1
	100 %

Tableau 14

Quand vous pensez à l'énergie nucléaire, diriez-vous que vous vous sentez :

When you think about nuclear energy, would you say that you feel:

Le nombre de personnes souhaitant l'abandon du nucléaire a augmenté de 7 points supplémentaires entre 2007 et 2011 (tableau 12). Sur la même période, le nombre de personnes favorables à l'implantation de nouvelles centrales sur les anciens sites a diminué de 10 points. La question ne porte pas sur l'ouverture de nouveaux sites, décision qui n'est pas à l'ordre du jour, mais sur l'implantation de nouveaux réacteurs sur les sites anciens.

Quand on interroge les individus sur leur approbation de la production d'énergie nucléaire, 41 % sont hésitants (tableau 13), ce qui n'est pas étonnant compte tenu de la complexité des questions énergétiques.

Pendant longtemps, on a cru que l'adhésion à l'énergie nucléaire était liée au niveau d'étude : plus le niveau d'étude était élevé, plus les individus étaient favorables à la science et donc à l'énergie nucléaire.

	Favorable	Hésitant ou sans opinion	Opposé
Échelle Gauche / Droite			
Gauche	14 %	48 %	38 %
Centre	20 %	62 %	18 %
Droite	43 %	44 %	13 %
Niveau d'études			
Primaire	15 %	58 %	27 %
Intermédiaire	16 %	58 %	26 %
Secondaire	24 %	48 %	28 %
Supérieur	23 %	51 %	26 %
Supérieur scientifique	34 %	41 %	25 %

Tableau 16

Personnellement, quelle est votre opinion sur le recours à l'énergie nucléaire en France ?

Personally, what is your opinion concerning France's use of nuclear energy?

Cette relation est actuellement plus compliquée car, de plus en plus souvent, on voit apparaître, dans les sondages, des scientifiques avec un niveau d'études élevé qui contestent le nucléaire.

La question de l'information sur le nucléaire est une de celle qui doit être traitée avec prudence car les enquêtés ont tendance à répondre qu'ils sont mal informés, mais ils ne font pas l'effort d'aller chercher l'information (tableau 14). Les 72 % d'enquêtés qui se disent mal informés ont vraisemblablement des niveaux de culture scientifique très variés car plus on connaît une question, plus les lacunes apparaissent.

Toutefois, proportionnellement, les scientifiques que l'on peut considérer comme bien informés sont moins hésitants sur l'attitude à adopter., ce qui permet de croiser les attitudes à l'égard de l'énergie nucléaire avec le degré d'information (tableau 15). Les résultats présentés montrent qu'au lieu de présenter un lien linéaire entre le niveau d'étude et l'approbation de l'énergie nucléaire, ce lien est plus complexe et décrit plutôt une courbe en « U » puisque les opposants sont « très bien informés » ou « très mal informés ».

Un scientifique travaillant pour une association de défense de l'environnement	39
Un scientifique travaillant pour le Centre National de la Recherche Scientifique	36
Un représentant de l'Autorité de Sécurité Nucléaire	12
Un représentant du Ministère de l'Environnement	6
SR	7
	100 %

Tableau 17

Des riverains d'une centrale nucléaire se demandent s'il est vrai ou non qu'il y a plus de risques de cancers dans le voisinage de cette centrale. Parmi les personnes suivantes, dans laquelle auriez-vous le plus confiance pour mener une enquête sur la réalité du risque ?

Residents close to a nuclear plant wonder whether it is true or not that there are more risks of cancer in the neighbourhood of the plant. Among the following persons, which one would you trust most to lead an enquiry about the reality of the risk?

Le rapport entre le niveau d'étude et l'appréciation du nucléaire est complexe. Le taux d'hésitants parmi les scientifiques de haut niveau est le même que celui trouvé pour la moyenne nationale. Seule l'opposition gauche/droite apparaît clairement. Ce critère politique ne prend pas en compte le militantisme mais simplement la proximité des idées. Le tableau montre un net clivage politique entre les personnes favorables à la gauche qui sont contre l'énergie nucléaire alors que celles qui votent plutôt à droite y sont favorables.

La dernière question concerne la confiance, question qui est régulièrement reprise dans le cadre des baromètres de l'IRSN². La question posée concerne les personnes auxquelles l'enquêté aurait accordé le plus de confiance pour mener une enquête sur la réalité du risque nucléaire à proximité d'une centrale. Bien sûr, les scientifiques recueillent une forte adhésion, mais ils ne sont pas perçus de la même manière s'ils travaillent pour une institution ou pour une association. Celui qui parle au nom d'une association est considéré comme plus fiable. Le scientifique est replacé dans son rôle social. Il faut conjuguer le désintéret financier, la compétence et l'engagement pour l'intérêt général pour être le mieux perçu. Les individus dignes de confiance doivent satisfaire aux deux qualités du mot anglais traduisant la confiance : *trust* (la fiabilité, le désintéret, l'impartialité) et *confidence*, la compétence.

Conclusion

Ces enquêtes montrent combien la santé n'est pas, pour les personnes interrogées, directement liée aux questions énergétiques. Cependant, de manière indirecte, par l'intermédiaire des pollutions et des risques, les choix énergétiques ne peuvent être exonérés d'une dimension sanitaire.

Les questions évoquées, comme le changement climatique ou les sources d'énergie, montrent la sensibilité de l'opinion publique vis-à-vis des événements politiques et, de manière générale, toutes ces questions, d'aspect plutôt scientifique, sont de plus en plus en phase avec des clivages politiques. La position dans l'échiquier politique devient un déterminant de plus en plus affirmé des positions prises par rapport aux questions énergétiques en général et à l'appréciation de l'énergie nucléaire en particulier.

Si les scientifiques les mieux informés peuvent être avertis sur l'origine du changement climatique, dubitatifs envers la place qui peut être accordée aux énergies renouvelables, ils sont hésitants sur la pertinence du nucléaire. Ces sondages mettent l'accent sur la difficile conjugaison entre la décision politique et la science. L'information scientifique apparaît insuffisante pour déterminer quels sont les bons choix politiques à effectuer en matière d'énergie.

1. <http://www.irsn.fr/fr/irsn/publications/barometre/Pages/default.aspx>
2. <http://www.irsn.fr/fr/irsn/publications/barometre/Pages/default.aspx>

L'électricité est-elle le vecteur énergétique de l'avenir pour la santé publique ?

Is electricity the energy vector of the future for public health?

Marcel JUFER¹

Résumé

La chaîne électrique, de la production au consommateur, implique conversion, transport et distribution. De façon générale, l'électricité joue un rôle de vecteur, équilibrant production et consommation, avec une quasi-impossibilité de stockage direct. Elle n'est en aucun cas une source directe de production d'énergie telle que pétrole, charbon, gaz, gaz de schiste, biogaz, bois, uranium, hydraulique et autres énergies renouvelables. L'électricité est seule à permettre de multiples formes finales de consommation de l'énergie : travail, électrochimie, chauffage, transport, traitement de l'information, etc. Énergie et communication jouent un rôle croisé.

L'électricité n'est que très peu stockable de façon directe (condensateurs) ou de façon indirecte (pompage-turbinage, électrochimie, chaîne du H₂) avec des rendements inférieurs à 80 %.

La détermination des densités d'énergie hydropneumatique, électromagnétique et électrostatique permet de comparer et de définir certaines limites dans l'usage de ces diverses formes. Les apports directs de l'électricité à la santé sont déjà nombreux : mesures, diagnostic, surveillance, rayons X, radiographie, RMN, IRM, appareillage de stimulation et prothèses, assistances, etc. Deux exemples sont développés : le cerveau avec le projet européen Human Brain Project et le cœur artificiel implantable.

Les apports indirects à la santé relèvent essentiellement de la possibilité de mieux maîtriser la pollution diffuse et les nuisances, en particulier dans le domaine des transports. De nouveaux composants sont décrits avec leurs potentialités, dont les supercondensateurs et le transfert d'énergie sans contact permettant un transport électrique souple. Des exemples concrets sont donnés sur des solutions futures dans les domaines du transport et de la santé.

Mots-clés

Électricité, stockage, batteries, super-condensateurs, énergie volumique, santé, cerveau, cœur artificiel, transmission sans contact, transport.

Abstract

Electrical chain, from the production to the consumer, involves conversion, transmission and distribution. Generally, electricity plays a role of vector, balancing production and consumption, with a near-impossibility of direct storage. It is not a direct source of energy production such as oil, coal, gas, shale gas, biogas, wood, uranium, hydro and other renewables. Electricity is only to allow multiple final forms of energy consumption: work, electrochemistry, heating, transport, processing, etc. The fields of energy and communication meet cross roles.

Electricity is only marginally storable in a direct way (capacitors) or indirectly (pump-turbines, electrochemistry, H₂) with less than 80% efficiency.

The determination of hydro-pneumatic, electromagnetic and electrostatic energy densities, allows comparison and limits in the use of these various forms.

The direct contributions of electricity to health are already numerous: measures, diagnosis, surveillance, x-ray, NMR, MRI, stimulation and prostheses, audience, etc. Two examples are developed: the brain with the European Human Brain Project and the implantable artificial heart.

The indirect contributions to health are essentially the ability to better control pollution and nuisance, especially in the field of transport. New components are described with their potential, including the super-capacitors and contactless energy transfer to a flexible electric transportation.

Concrete examples are given on future solutions in the fields of health and transport.

Keywords

Electricity, storage, batteries, super-capacitors, energy density, health, brain, artificial heart, contactless energy transfer, transport.

1. Électricité – vecteur énergétique

Pour mieux appréhender les éléments décrits par la suite, il est nécessaire de rappeler quelques éléments intrinsèques au domaine de l'électricité.

Il n'existe ni puits ni mines d'énergie électrique : à l'exception de la conversion photovoltaïque, elle résulte exclusivement de la conversion électromécanique d'énergie potentielle d'origine solaire (hydraulique, éolienne) ou de conversion thermomécanique (pétrole, charbon, gaz, nucléaire).

Ses atouts sont :

- sa facilité de transport et de distribution, en adaptant le niveau de tension ;
- son caractère propre et non polluant ;
- sa facilité de conversion en de nombreuses autres formes avec un bon rendement : travail,

chaleur, électrolyse, lumière, traitement de l'information, etc.

Outre l'inconvénient de ne pas exister naturellement de façon exploitable, elle est difficilement stockable de façon directe.

On a coutume de subdiviser son usage en deux grands domaines :

- l'énergie ;
- le traitement de l'information et la communication.

Les deux sont cependant fortement liés, le traitement de l'information consommant de plus en plus d'énergie, en particulier par les grands serveurs informatiques. Par ailleurs, les systèmes électroniques de mesure et de communication contribuent fortement à la gestion des réseaux et aux domaines tels que machines-outils et robotique.

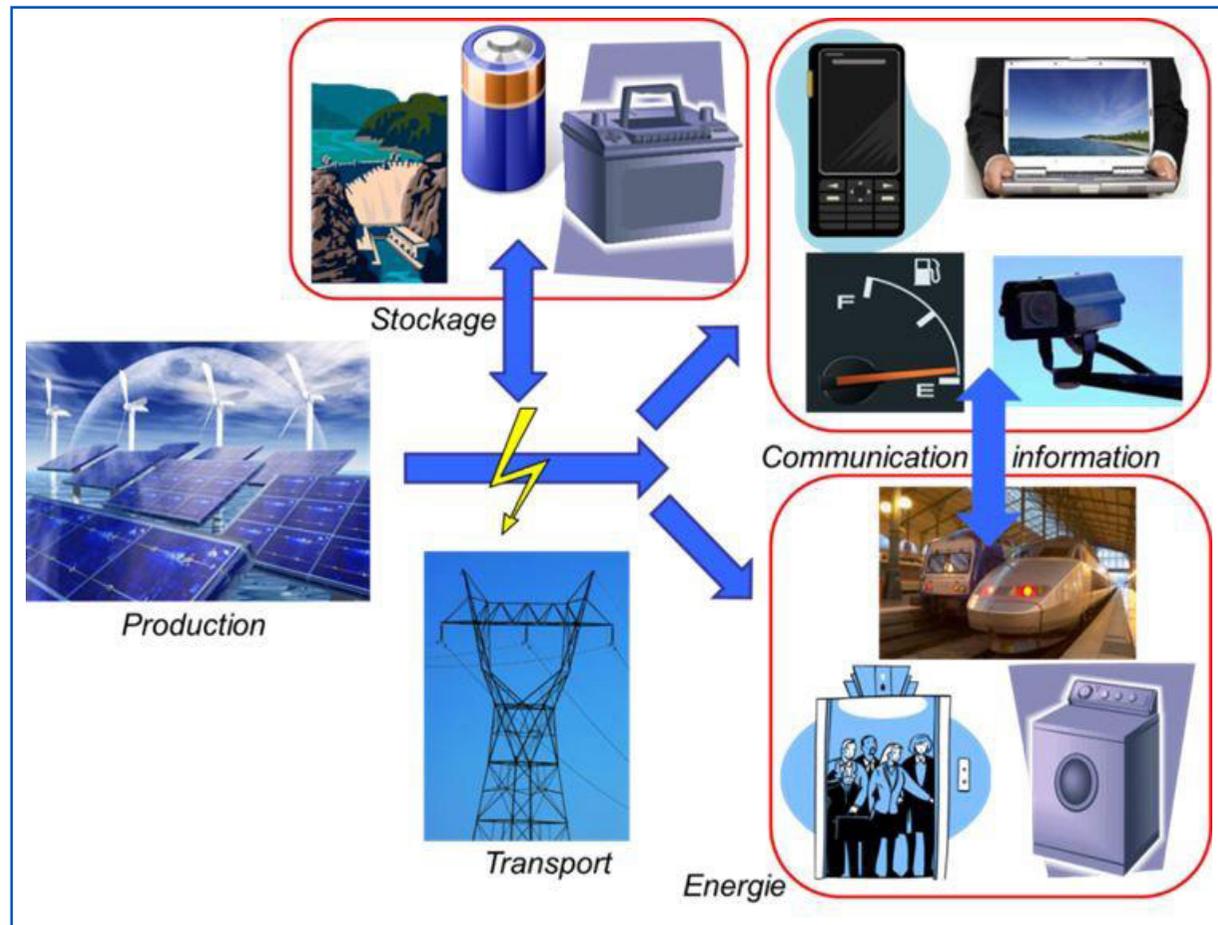


Figure 1

Électricité, vecteur entre production et utilisation comme énergie ou système de traitement de l'information (source : M. Jufer).

Electricity, vector between production and use as energy or information processing system.

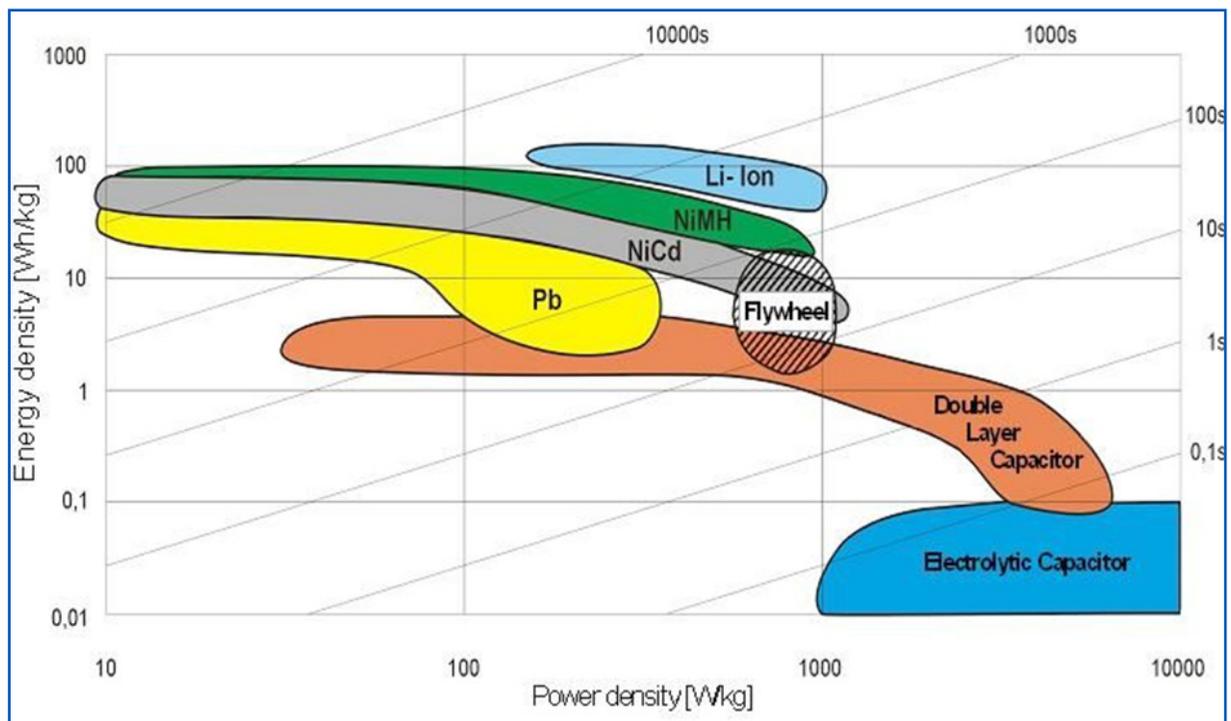


Figure 2

Comparaison des densités énergétiques et des puissances massiques des principales batteries et des supercondensateurs (source : ika.rwth-aachen.de).

Comparison of energy densities and mass powers of main batteries and super-capacitors.

L'énergie électrique ne conserve cependant pas l'exclusivité en matière d'application pratique par deux limites physiques et techniques :

- la difficulté et les limites du stockage direct et indirect ;
- les limites d'énergie volumique.

2. Stockage et énergie volumique

La seule possibilité de stockage direct de l'énergie électrique est la charge de condensateurs et plus particulièrement de supercondensateurs recourant à la nanotechnologie du carbone. Si les énergies volumiques ou massiques restent faibles comparées aux batteries, en revanche les puissances volumiques sont nettement plus élevées que pour les meilleures batteries, permettant des charges et décharges ultrarapides (figure 2).

Les principales possibilités de stockage indirect sont :

- le stockage sous forme potentielle de gravitation par le pompage-turbinage hydraulique. Les

rendements globaux actuels sont de l'ordre de 80 %, ce qui offre des potentialités intéressantes en termes d'heures de creux et heures de pointe. Un pays comme la Suisse est en train d'étendre son réseau dans ce domaine (figures 3 et 4) ;

- le stockage sous forme électrochimique dans des batteries (acide-Pb, Ni-Cd, Li-ions, etc.) ;
- la chaîne de stockage de l'hydrogène : Électrolyse de l'eau – H₂ – pile à combustible – électricité et eau.

Tout système de conversion permettant de générer un travail (moteur, vérin, piston, etc.) peut être caractérisé par son énergie volumique ou sa pression ($J/m^3 = N/m^2$). Pour fixer les ordres de grandeur, une comparaison peut être faite entre trois systèmes :

- hydropneumatique ;
- électrostatique ;
- électromagnétique.

La figure 5 en montre des dispositions possibles.

Le système hydropneumatique peut atteindre des pressions maximales de l'ordre de 400 bar, soit $w_p = 4 \cdot 10^7 J/m^3$.

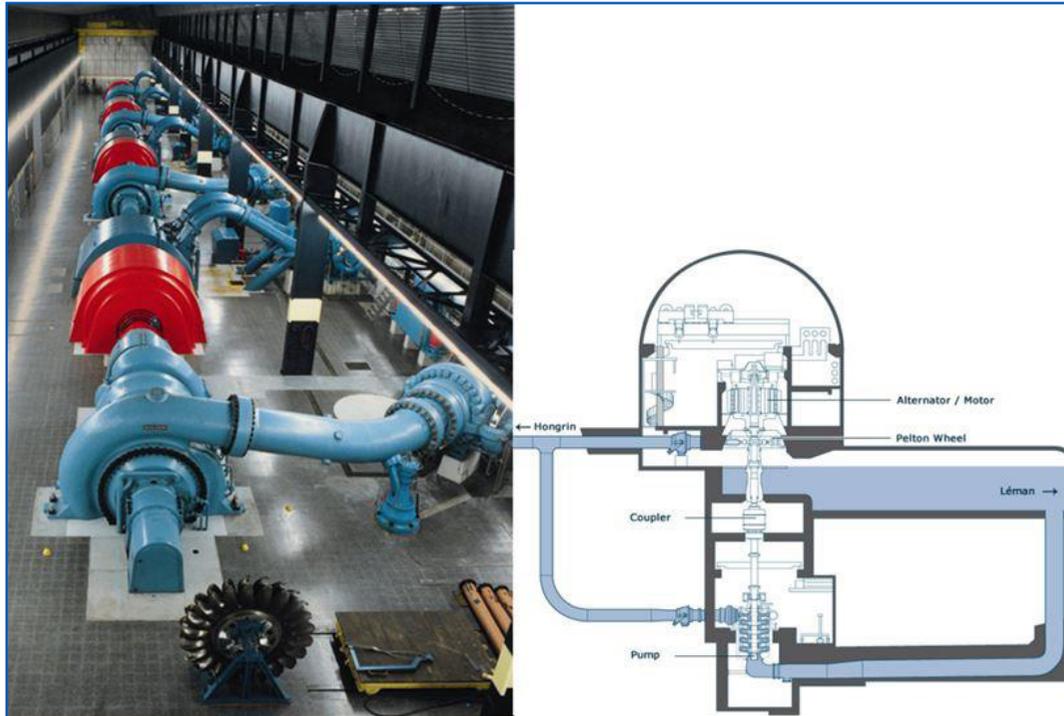


Figure 3

Centrale de 240 MW (1968). Extension de 240 MW (en cours).
 Centrale de pompage-turbinage de Veytaux entre les lacs Léman et de l'Hongrin. Différence de niveau de 870 m – Énergie potentielle de 8,5 kJ/kg ou 2,4 Wh/kg (source : Alpiq.com).
 240 MW power plant (1968) Extension of 240 MW (in progress). Pump-turbine power plant of Veytaux between Geneva's and Hongrin's lakes.
 Level difference of 870 m - energy 8.5 kJ/kg or 2.4 Wh/kg

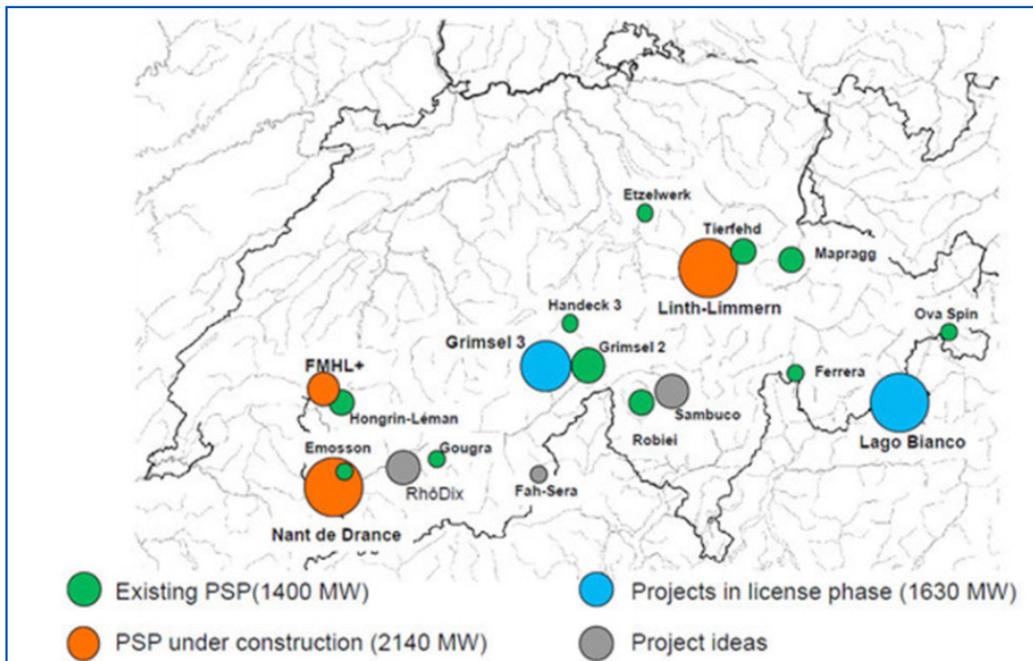


Figure 4

Sites de pompage-turbinage en Suisse, existants, en construction et en projet (source : Le matin.ch).
 Pump-turbine sites in Switzerland, existing, under construction and projected.

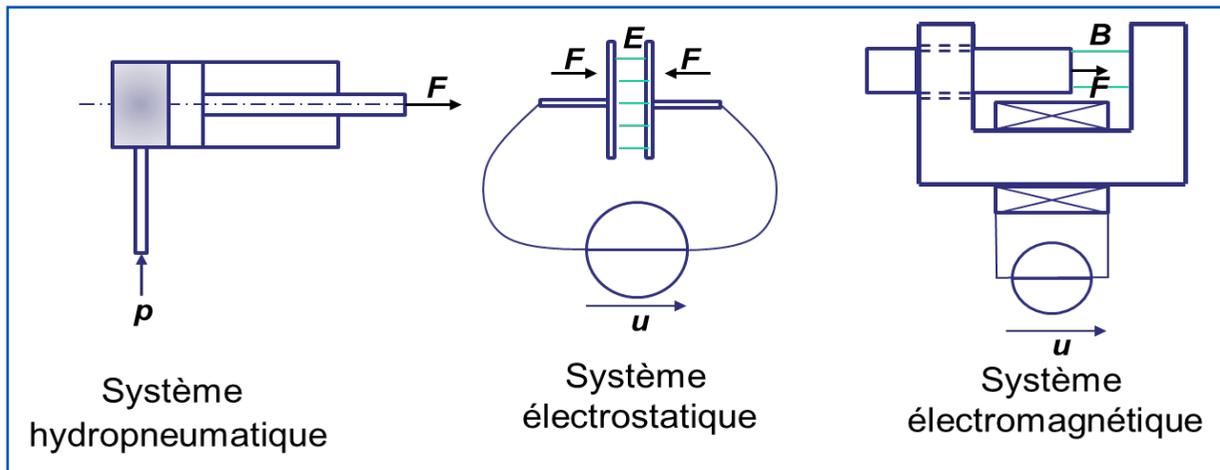


Figure 5

Composants élémentaires de génération de travail (source : M. Jufer).

Basic components of work generation.

3. Électricité et santé – Action directe

Pour un système électrostatique dans l'air, un champ électrique maximum de 3.106 V/m est une limite. Il en résulte l'énergie volumique suivante :

$$w_{es} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = 40 \frac{J}{m^3}$$

$$w_{es} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = 40 \frac{J}{m^3}$$

Pour un système électromagnétique, une induction de 1 à 1,5 T est courante. Il en résulte l'énergie volumique suivante :

$$w_{em} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} = 4 \text{ à } 9 \cdot 10^5 \frac{J}{m^3}$$

$$w_{em} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} = 4 \text{ à } 9 \cdot 10^5 \frac{J}{m^3}$$

Clairement, le système électrostatique ne convient pas à la conversion électromécanique. Si un système hydropneumatique peut être de 40 à 100 fois plus performant qu'un système électromagnétique, il souffre de l'inconvénient de la création de la pression par un combustible sur le système lui-même ou par un moteur électrique et une pompe.

L'analogie entre homme et système électrique est duale pour deux aspects (figure 1) :

- Le système nerveux, avec le cerveau comme serveur central, analogue à la communication et au traitement de l'information. Luigi Galvani a été le premier à mettre en évidence ces propriétés par ses expériences sur les grenouilles.

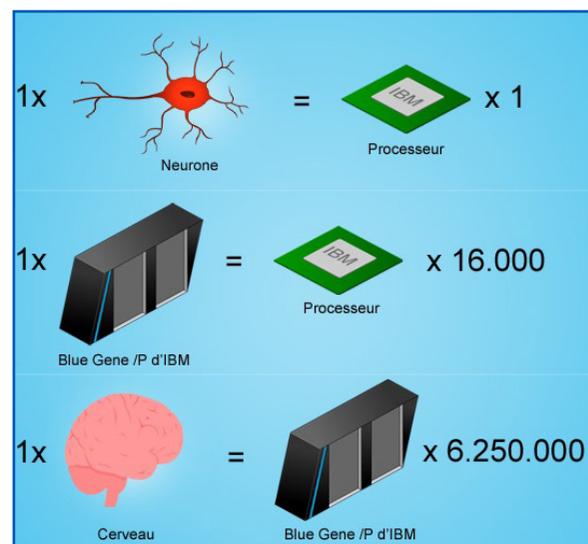


Figure 6

Modélisation d'un neurone, du projet européen Human Brain Project³ et du cerveau par des processeurs actuels (source : EPFL).

Modelling of a neuron by the European Human Brain Project and of the brain by current processors.

Il est logique que de nombreuses applications dans le domaine médical agissant sur le système nerveux recourent à l'électricité. C'est en particulier le cas pour la lutte contre la douleur et la stimulation musculaire. De nombreux recours au traitement de l'information permettent le diagnostic (rayons X, IRM, RMN), la mesure (capteurs implantés) et le monitoring (soins intensifs).

- Le système cardio-vasculaire, avec le cœur comme générateur et le sang comme vecteur, analogue à l'énergie électrique. C'est principalement pour suppléer aux déficiences physiques et permettre la rééducation que des aides électromécaniques offrent une contribution à la santé. On peut mentionner la robotique, l'exosquelette, des prothèses actives et de nombreuses aides chirurgicales.

Deux exemples de recherche de pointe permettent d'illustrer les potentialités.

Le projet européen Human Brain Project², dont l'EPFL est le leader avec 79 partenaires institutionnels en Europe, a pour but de modéliser des parties du cerveau. L'objectif est scientifique



Figure 7

Expérience de guidage d'un robot par le cerveau d'une personne handicapée (source : EPFL-24 Heures).

[Guiding experience of a robot by the brain of a person with a disability.](#)

et médical, en visant une meilleure connaissance des maladies dégénératives du cerveau telles qu'Alzheimer et Parkinson. La figure 6 illustre les potentialités respectives d'un neurone, du cerveau et des processeurs actuels. En parallèle avec ces développements, des expériences de guidage de chaises roulantes et de robots par la pensée pour des paraplégiques est en cours (figure 7).

Un projet de cœur artificiel (Jufer *et al.*, 1992 ; Hahn *et al.*, 1991) datant de plus de 20 ans, mais toujours actuel, permet d'illustrer les potentialités et les limites techniques et économiques de l'électricité. Au début des années 80, plusieurs cœurs artificiels ont fait leur apparition aux USA. Ils étaient tous composés de deux ventricules externes indépendants, activés par de l'air comprimé, assurant la circulation sanguine au moyen de quatre cathéters à travers la peau (figure 8). La qualité de vie en résultant était très faible. Ces systèmes n'ont été utilisés pratiquement que comme ponts à la transplantation. Un projet suisse a assuré le développement d'un

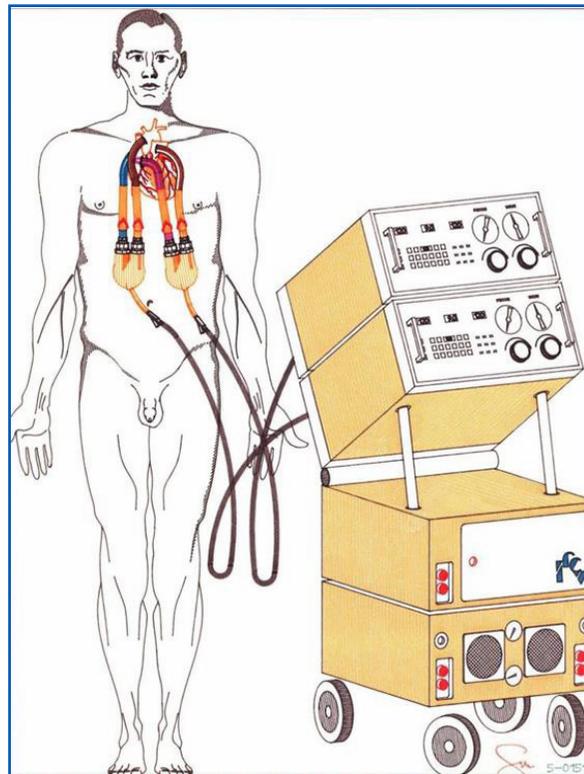


Figure 8

Ventricules artificiels externes activés par air comprimé (source : IRCV (fondation disparue)-EPFL, Sandrine Cabut, Le Monde).

[External artificial ventricles activated by compressed air.](#)

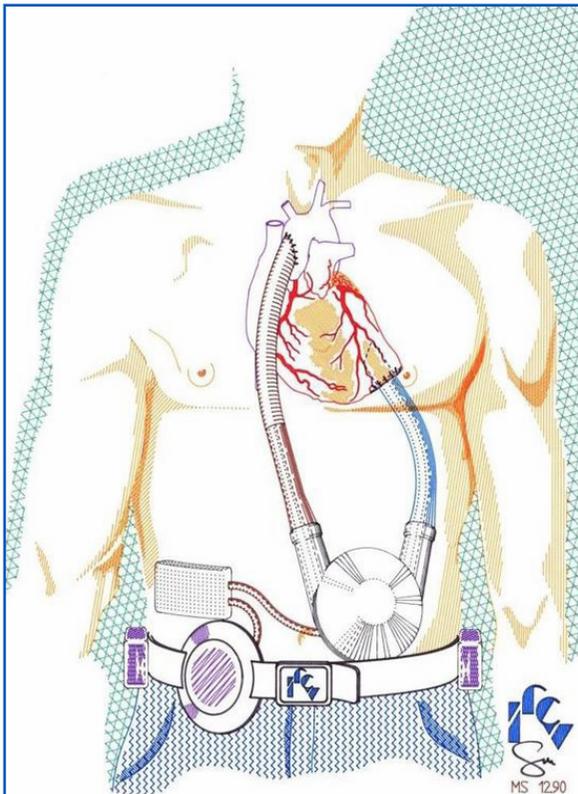


Figure 9

Ventricule artificiel électrique implanté alimenté sans contact à travers la peau (source : IRCV (fondation disparue)-EPFL).

Implanted electric artificial ventricle powered contactless through the skin.

ventricule (figure 9) et d'un cœur (figure 10) artificiels électromécaniques implantables, alimentés par une transmission d'énergie sans contact à travers la peau. La puissance électrique moyenne nécessaire pour activer un tel cœur pour un adulte est de l'ordre de 8 W, soit une énergie de 192 Wh par jour. Les meilleures batteries Li-ion ont des capacités de 100 à 250 Wh/kg. En conséquence, une batterie d'un kg suffirait pour une autonomie d'un jour.

Malgré les tests réussis *in vitro* et *in vivo*, le projet a finalement été abandonné en phase d'industrialisation, à cause des coûts de validation et d'implantation.

Récemment, le 18 décembre 2013, un patient a été doté d'un cœur artificiel dit Carmat, développé en France sous la direction du professeur Alain Carpentier depuis 1988 (Cabut, 2013a, 2013b). Il se différencie par l'usage d'un fluide hydraulique comprimant alternativement les ventricules gauche et droit au moyen de deux pompes intégrées. Aucune information n'a été

donnée concernant l'alimentation électrique.

4. Électricité et santé – Action indirecte

4.1 Énergie électrique et pollution

L'électricité, vecteur énergétique, ne pollue pas, et la plupart de ses formes de conversion sont peu bruyantes. À ce titre, elle est idéale quant à ses applications. En revanche, la production d'énergie électrique est souvent polluante, en particulier les centrales au fuel et au charbon. Cependant, il est plus facile de prévenir la part la plus nuisible pour la santé dans une grande centrale que pour des consommateurs de faible puissance en grand nombre, comme l'ensemble des moteurs diesel de camions, de voitures et de machines de service. Ceci plaide donc en faveur d'un usage accru de l'énergie électrique pour des applications utilisant actuellement des énergies directes polluantes.

4.2 Véhicules électriques

De nos jours, un véhicule électrique est principalement équipé avec des batteries (plomb, Ni-Cd, Li-ions, etc.), un moteur électrique avec transmission, une commande avec électronique de puissance et un système de charge de la batterie.

Les principaux avantages de cette technologie par rapport à un véhicule à moteur à essence ou diesel sont :

- pas de pollution locale et pratiquement aucun bruit ;
 - un couple de démarrage élevé (pas d'embrayage) et un moteur souple ;
 - des coûts énergétiques plus faibles et une économie d'énergie fossile
- Cependant, quelques inconvénients importants sont à considérer :
- le poids, le coût et la durée de vie limitée des batteries ;
 - l'autonomie faible comparée à un réservoir d'essence ;
 - le temps important de recharge des batteries.

Ces aspects limitent les possibilités d'une voiture électrique pour remplacer une voiture à essence ou diesel.

De nombreuses applications de transport ne

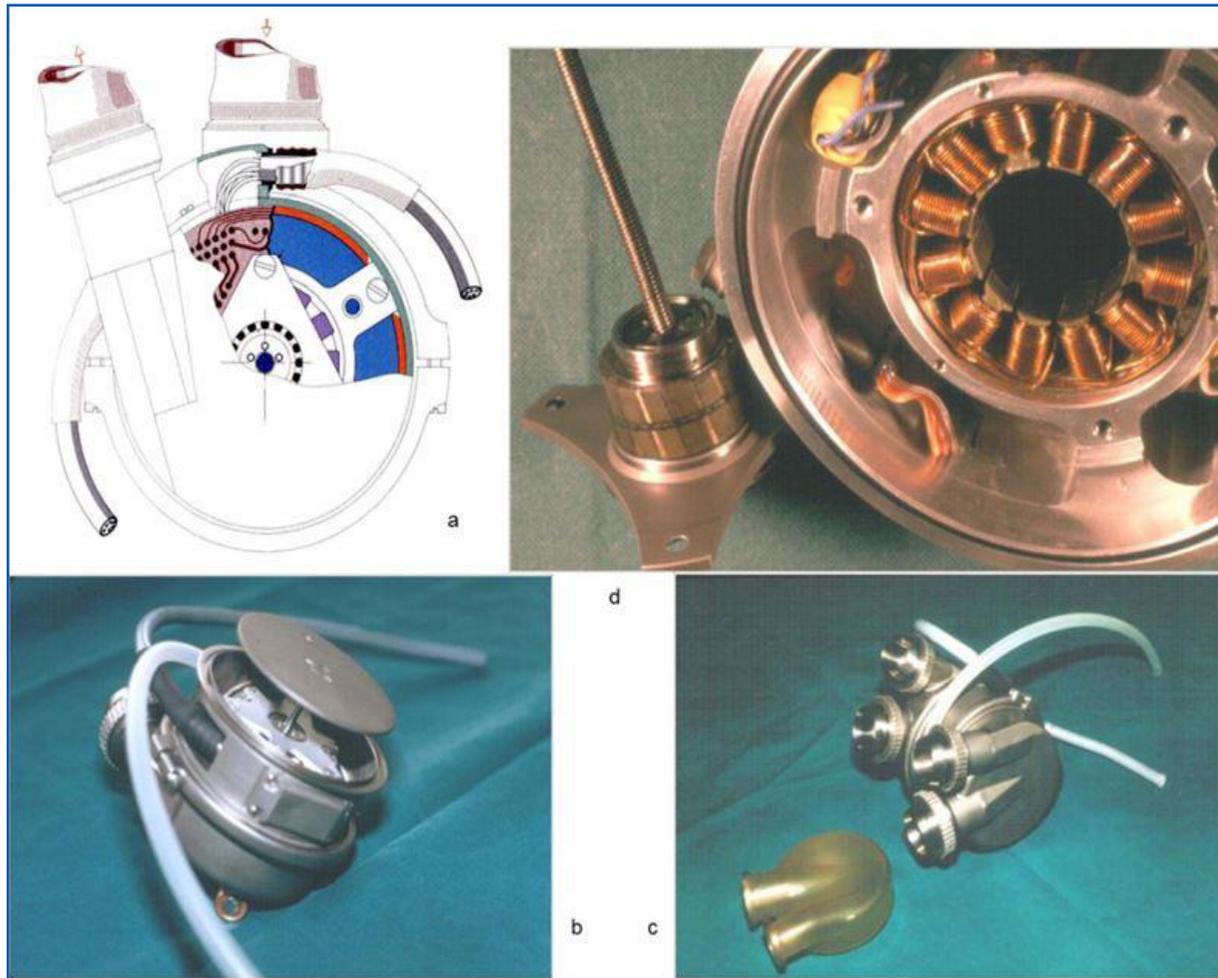


Figure 10

Cœur artificiel électromécanique implantable pour un veau
(source : IRCV (fondation disparue)-EPFL).

a. dessin – b. cœur et plateau activateur – c. cœur et ventricule –
d. stator et rotor du moteur et vis d'activation.

[Implantable electromechanical artificial heart for a calf.](#)

[a. drawing – b. heart and activator pusher plate – c. heart and ventricle –
d. motor stator and rotor with activation screw.](#)

nécessitent pas une autonomie importante avec de nombreux arrêts, généralement pour le transport de passagers et de marchandises dans les villes.

Les technologies proposées ci-après offrent la possibilité de réduire les problèmes les plus importants des véhicules électriques et ainsi d'accroître leur champ d'applications.

4.3 Nouvelles technologies et composants

Les principales propositions de nouvelles technologies et de composants sont :

- la transmission d'énergie électrique sans contact (Jufer, 2008 ; Jufer *et al.*, 1996), composée d'un bobinage fixe, sur ou dans le sol, alimenté par un convertisseur de fréquence élevée et d'un enroulement placé sous le véhicule. Ainsi, un véhicule peut être chargé sans raccordement de câble, simplement en étant positionné au-dessus de la bobine au sol (figure 11). Le rendement peut être élevé, de l'ordre de 95 % entre le réseau et le véhicule (figure 12). De tels systèmes existent déjà pour des applications spécifiques, tels que cuisinières électriques à induction ou recharge de brosses à dents électriques.

Avantages : aucune connexion n'est néces-

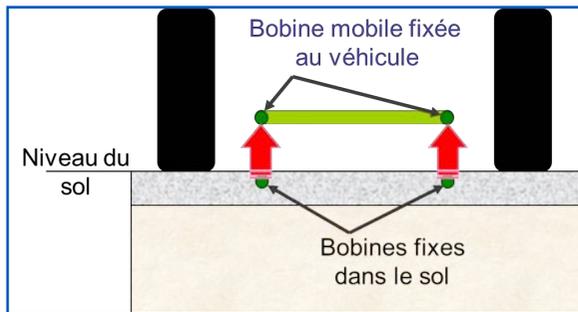


Figure 11

Principe de la transmission d'énergie électrique sans contact pour un véhicule (source : EPFL-Numexia (société disparue)).

Principle of contactless electrical energy transmission for a vehicle.

saire pour transférer l'énergie au véhicule, avec un rendement élevé ; bobine fixe dans ou sur le sol ; pas d'usure ni de maintenance.

Inconvénient : une telle transmission d'énergie s'accompagne d'un rayonnement électromagnétique. Celui-ci doit respecter les normes associées à sa fréquence. Si l'intensité dépasse le seuil prévu, un blindage magnétique associé au véhicule doit ramener les valeurs dans les limites (Parlement européen, 2013).

- les batteries électrochimiques dont l'énergie volumique croît progressivement, en particulier pour le Lithium-ions. Les chiffres donnés varient souvent selon qu'il s'agit de produits industriels ou de développements de laboratoires. Le principal inconvénient de ce type de batteries est leur mauvais fonctionnement au-dessous de 5 °C. Pour les batteries électrochimiques, l'énergie stockée est dans la plage de 40 à 250 Wh/kg. La puissance maximale réalisable est de 10 à 1 000 W/kg pour les batteries électrochimiques. Ces dernières valeurs correspondent à la puissance de crête de décharge et elles sont plus faibles pour la puissance de charge.

Avantage : stockage énergétique avec une autonomie de 50 à 200 km.

- les supercondensateurs (supercaps) dont l'énergie volumique est inférieure à celle d'une batterie, mais dont la puissance maximale est beaucoup plus élevée ; cela permet de charger en très peu de temps (5 à 30 s) une quantité importante d'énergie sur un véhicule. Ils sont déjà utilisés pour stocker de l'énergie électrique sur des bus. Une application est développée sur certaines voitures hybrides pour récupérer l'énergie en des-

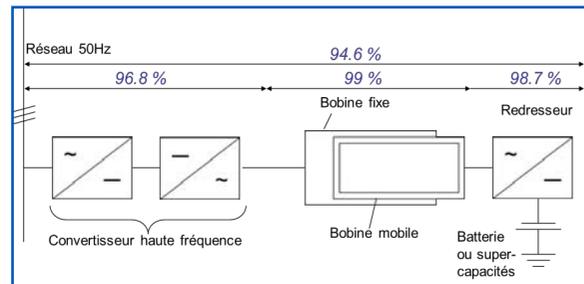


Figure 12

Composants et rendements d'une transmission d'énergie électrique sans contact de 120 kW (source : EPFL-Numexia (société disparue)).

Components and efficiencies of a 120 kW contactless electrical energy transmission.

cente ou au ralentissement. L'énergie stockée n'est que de 1 à 10 Wh/kg. En revanche, la puissance maximale disponible est importante : de 1 000 à 15 000 W/kg. Dans ce cas, les puissances de charge et de décharge sont les mêmes. Il est également important de préciser que les cycles de vie sont 10 à 100 fois supérieurs pour les supercaps.

Avantage : possibilité de stocker de l'énergie électrique en un temps très court (puissance élevée).

- moteurs roues qui peuvent être intégrés directement dans la jante, avec un rotor externe.

Avantage : plus de transmission avec des problèmes de maintenance ; plus de couple volumique ou massique (de 2 à 5 fois) par rapport à une solution à rotor interne ;

- intégration du moteur dans la jante.

Avantage : meilleure intégration et un guidage plus efficace.

Guidage automatique et localisation de véhicules, sans chauffeur. Le coût d'exploitation du véhicule repose principalement sur les salaires des chauffeurs. Pour des véhicules à basse vitesse, un guidage automatique et un système de positionnement, combinés avec une vision laser, peuvent être réalisés avec haute sécurité et fiabilité, jusqu'à 30 km/h.

Avantage : extension des possibilités d'application et de services ; économie des coûts d'exploitation.

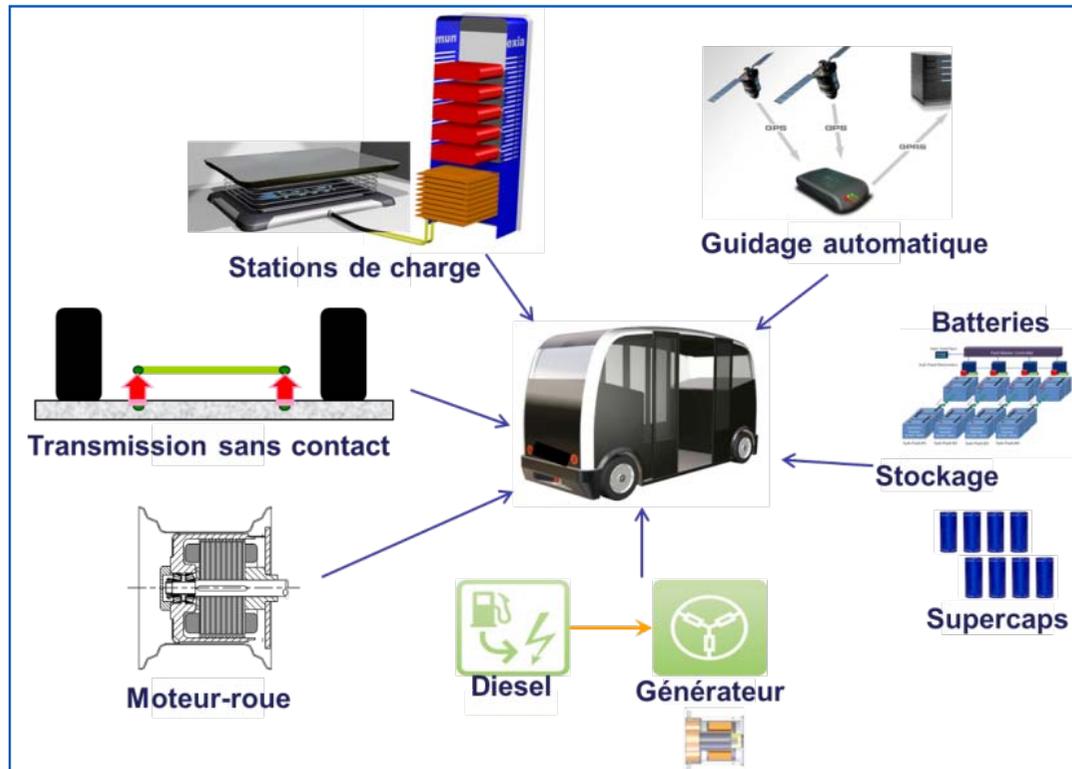


Figure 13

Principaux composants d'un nouveau véhicule électrique (source : EPFL-Numexia (société disparue)).
 Main components of a new electric vehicle.

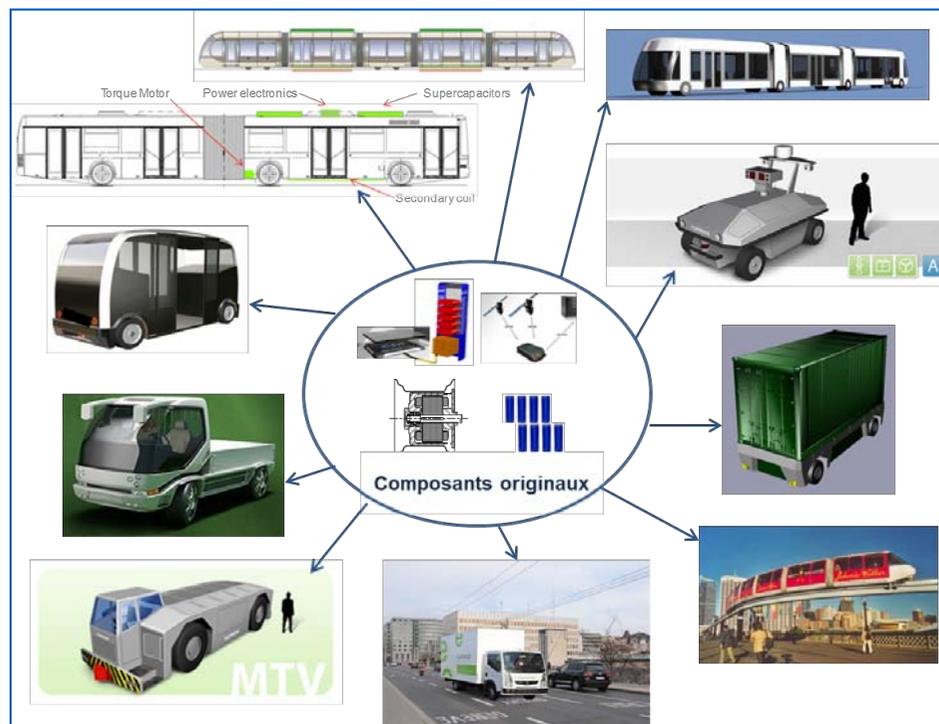


Figure 14

Nouvelles possibilités de réalisation de véhicules électriques
 (source : EPFL-Numexia (société disparue)).
 New opportunities for realization of electric vehicles.



Figure 15

Véhicule automatique de manutention de conteneurs
(source : EPFL-Numexia (société disparue)).
Automatic container handling vehicle – prototype.

- système de gestion de l'énergie, qui contrôle, transforme et adapte l'énergie électrique du véhicule au système de chargement, à la batterie, aux supercaps et aux moteurs. Il est composé de dispositifs de contrôle, de communication et d'électronique de puissance.

Avantages: souplesse et performances

À la figure 13, ces principaux nouveaux composants sont illustrés. Ils sont tous utilisables sur le même véhicule ou indépendamment. Toutefois, la transmission d'énergie sans contact doit être utilisée avec supercaps et/ou batteries. Il est également possible de combiner ces technologies avec des véhicules hybrides (moteurs électriques, Diesel + générateur).

4.4 Nouveaux véhicules

En utilisant principalement les technologies de stockage de l'énergie sur supercaps, (combinées ou non avec des batteries), chargées par une transmission d'énergie sans contact, il est possible d'imaginer différents véhicules avec assez d'autonomie entre le chargement à des stations éloignées de 100 m à 2 000 m en un temps de 10 à 30 s.

À la figure 14 (de la gauche, dans le sens horaire), différentes applications sont proposées :

- trolleybus sans caténaire sur toute la ligne, sur un prolongement de la ligne ou dans les centres historiques des villes ;
- tramways ;
- bus électriques ou hybrides ;

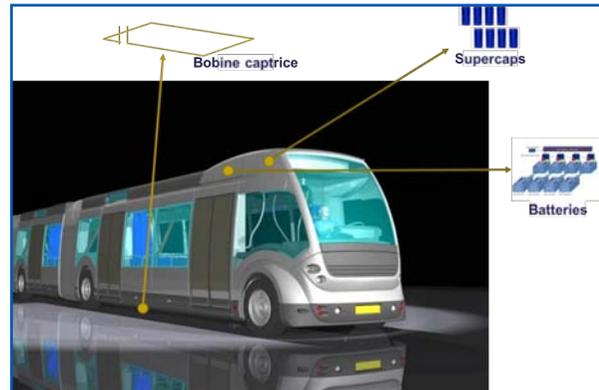


Figure 16

Bus électrique à recharge sans contact
(source : M. Jufer).

Electric bus with contactless loading system.

- véhicules de sécurité ;
- véhicules à guidage automatique pour manutention de conteneurs dans les ports ;
- monorails ;
- véhicules de livraison dans les villes (généralement hybrides) ;
- pousseurs d'avions ;
- véhicules électriques de service (nettoyage, maintenance, etc.) ;
- petits véhicules automatiques de transport de passagers.

4.5 Applications existantes ou en développement

Trois exemples en cours de développement sont décrits ci-après :

Véhicule automatique de manutention de conteneurs (figure 15). Prototype équipé de



Figure 17

Navette automatique Navia (photo : M. Jufer).
Automatic shuttle Navia.

supercaps avec recharge sans contact, destiné à de grands ports ; autonomie de 1 500 m.

Bus électrique (figure 16), intégrant une combinaison de batteries et de supercaps, rechargées avec ou sans contact en stations. Réalisations en Chine, prototypes en Allemagne et en Suisse.

Navette automatique (figure 17). Véhicules automatique NAVIA (Induct, <http://induct-technology.com/>) d'une capacité de 4 à 8 passagers, intégrant les principales technologies proposées, qui pourrait trouver une large gamme de domaines d'application :

- rues piétonnes et commerçantes ;
- campus universitaires ou de grandes entreprises ;
- liaisons entre terminaux aéroportuaires ;
- grands centres d'exposition ;
- grands parkings ;
- parcs d'attraction, etc.

Conclusion

L'électricité, par ses qualités intrinsèques, offre de nombreuses potentialités d'apport à la santé et à la qualité de vie. Outre ce qui existe, des développements en cours dans les domaines neurologiques, du diagnostic continu, des organes artificiels et de la rééducation sont déjà prometteurs.

Mais c'est aussi en matière de contribution indirecte de l'électricité, par réduction de la pollution et des nuisances, que la plus grande potentialité existe.

Comme l'ensemble des contributions à ce thème l'a montré, c'est par le recours à tout un ensemble de mesures préventives associées à un choix judicieux de technologies et en s'interdisant certaines d'entre-elles que l'on parviendra à l'objectif : l'amélioration de la qualité de vie sans altération du climat.

1. Professeur honoraire de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, marcel.jufer@epfl.ch
2. <https://www.humanbrainproject.eu/>
3. Jufer, 1998.

Références

- Cabut S. (2013a). Première implantation d'un cœur artificiel total, *Le Monde*, 20 décembre.
- Cabut S. (2013b). Cœur artificiel, une prouesse made in France, éditorial *Le Monde*.
- Hahn C., Galletti P-M., Jufer M. *et al.*, (1991). *Du cœur mystique au cœur mécanique*, Lausanne, Éditions 24 Heures.
- Jufer M. (1998, [1979, 1995]). *Electromécanique*, PPUR, 384 p.
- Jufer M., Pillon M., Odermatt R., (1992). *Technical aspects of a total electromechanical heart*, *Artificial Heart - The Development of Biomation in the 21st Century*, Yukiyasu Sezai, MD, FACS, Nihon University, Tokyo, p. 81-88.
- Jufer M. (2008). *Electric Drive System for Automatic Guided Vehicles Using Contact-free Energy Transmission*, EPE-PEMC, Poznan, 6 p.
- Jufer M., Perrottet M., Macabrey N. (1996). "Contactless Energy Transmission for Electric Drives", *EPE Chapter Symposium on Electric Drive Design and Applications*, Nancy, Juin, p. 7-12.
- Parlement Européen. (2013). Directive L 179 2013/35/UE du parlement européen et du Conseil du 26 juin concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques), abrogeant la directive 2004/40/CE.

Biomasse énergie, pollution atmosphérique et santé

Biomass energy, air pollution and health

Paul MATHIS

FNAUT (Fédération Nationale des Associations d'Usagers des Transports)

Résumé

Cet article est une revue des effets qu'a sur la santé humaine l'utilisation de biomasse-énergie. Outre les émissions d'oxydes d'azote et de certains métaux, ces effets résultent essentiellement d'une combustion incomplète, source de polluants atmosphériques : particules fines, monoxyde de carbone, composés organiques volatils, hydrocarbures aromatiques polycycliques. La question est examinée sous quatre aspects : l'utilisation de combustibles solides pour la cuisson dans les pays pauvres, le chauffage au bois, l'incinération de déchets organiques, et les biocarburants. Dans tous les cas, des effets sanitaires sont établis, mais ils peuvent généralement être prévenus.

Mots-clés

Biocarburants, biomasse, bois, bpc, cancer, chauffage, combustion, cuisson, déchets, fumées, hydrocarbures aromatiques polycycliques, incinérateur, particules fines, pneumonie.

Abstract

This article reports the negative effects on human health due to the use of biomass for energy. In addition to the emission of nitrogen oxides and of metals, these effects result largely from an incomplete combustion, generating various air pollutants: fine particles, carbon monoxide, volatile organic compounds and aromatic polycyclic hydrocarbons. Four situations are discussed: indoor air pollution due to cooking in developing countries, residential wood combustion for heating, the use of biofuels, and waste incineration. In all cases, negative health effects have been demonstrated, but they can be prevented by appropriate strategies.

Keywords

Biofuels, biomass, cancer, combustion, cooking, copd, fine particles, heating, incinerators, municipal wastes, polycyclic aromatic hydrocarbons, pneumonia, smoke, wood.

1. Introduction

1.1 Rappels sur la biomasse

La biomasse est le fruit de la photosynthèse effectuée par les végétaux, plantes et algues, qui utilisent l'énergie de la lumière solaire pour synthétiser toutes leurs biomolécules (Bichat et Mathis, 2013). Dans son étymologie, le préfixe « bio » indique bien son origine biologique, tandis que « masse » signifie qu'il s'agit de produits formés en grande quantité. La biomasse a trois sources essentielles : la forêt, avec le bois, les cultures, et les déchets organiques ménagers

ou industriels. Il faut noter que la biomasse est constituée de molécules, parmi lesquelles trois classes sont particulièrement importantes : les hydrates de carbone ou sucres, les lipides, et la lignocellulose, elle-même composée de molécules complexes, cellulose, hémicellulose et lignine.

La biomasse est utilisée par les humains pour répondre à de multiples besoins :

- l'alimentation, besoin incontournable et prioritaire
- les matériaux, pour le bâtiment (bois d'œuvre, isolants thermiques), pour la fabrication d'outils,

pour l'industrie (papier, agglomérés), pour produire des textiles (coton, laine, lin...)

- l'obtention de produits chimiques (comme le latex) et pharmaceutiques. La chimie biosourcée est appelée à se développer en remplacement de produits pétroliers et du charbon

- la production d'énergie (chauffage, cuisson, biocarburants). Cet usage est très traditionnel puisque la biomasse fournissait 90 % de l'énergie mondiale jusqu'en 1800.

On perçoit donc beaucoup d'usages qui sont tous appelés à se développer, et parmi lesquels l'énergie n'est généralement pas prioritaire.

1.2 Biomasse-énergie : de nombreux aspects positifs

En matière d'énergie, la biomasse constitue l'énergie renouvelable la plus importante. Sur la planète, elle fournit environ 1,3 Gtep, soit 75 % des énergies renouvelables. Ce chiffre est difficile à préciser tant est grande la part de biomasse informelle, produite et utilisée par les paysans, surtout pour leurs besoins de cuisson. En France, la production de biomasse-énergie est de 15 Mtep, soit les deux tiers de nos énergies renouvelables.

Cette biomasse-énergie présente de nombreux aspects positifs : elle est disponible presque partout, et elle est bon marché. Pour les pays qui ont le souci du climat, la biomasse est une énergie renouvelable, et sa consommation n'augmente pas l'effet de serre car, si du CO₂ se dégage bien lors de sa combustion, une quantité égale est prise par photosynthèse pour produire la même biomasse. Cela est théorique : il est de nombreux cas où la vitesse de consommation de biomasse dépasse sa formation. Ce sont des situations où la biomasse n'est pas réellement une énergie renouvelable et où son bilan CO₂ est mauvais.

Au plan de la santé, la production de biomasse alimentaire a évidemment un intérêt majeur. Il en est de même pour l'énergie, tant est positif l'impact sanitaire de cette dernière, avec la possibilité de cuisson des aliments, de chauffage des habitations, de fonctionnement des machines qui soulagent l'effort des travailleurs, etc.

Toutefois la biomasse-énergie présente aussi des impacts sanitaires négatifs et de grande amplitude. Ils sont l'objet de cette revue.

1.3 Particules et gaz toxiques : pourquoi ces émissions ?

À l'origine des impacts négatifs sur la santé, il y a la pollution atmosphérique due aux émissions de particules et de gaz toxiques. Pourquoi ces émissions ? Notons d'emblée que la biomasse est toujours utilisée par combustion, et distinguons trois situations.

1.3.1 La combustion du bois

Il s'agit d'un processus complexe, qui dépend beaucoup de la teneur en eau du bois, de la température de combustion et de l'arrivée d'air. Le bois sec et propre brûle bien en présence de suffisamment d'air, et à température élevée, supérieure à 600 °C. Dans ce cas, les émissions seront essentiellement du CO₂, des oxydes d'azote (NOx), quelques métaux (Cr et Ni) et des cendres minérales (chlorures et sulfates), outre la vapeur d'eau évidemment. Mais les fumées contiennent toujours des molécules carbonées plus ou moins lourdes qui vont pour partie se condenser dans la cheminée (suies, goudrons) et pour partie gagner l'atmosphère.

Il est des situations qui donnent lieu à une moins bonne combustion : une température trop basse, la présence d'eau dans le bois, ou un manque d'air. On a alors un moins bon rendement énergétique et une émission importante de particules et de gaz qui peuvent être nocifs. La question des particules est très complexe (Kocbach Bolling *et al.*, 2009 ; Naeher *et al.*, 2007). Celles-ci sont des particules de carbone organique ou des particules de carbone atomique (suie), auxquelles s'associent d'autres composés. Quant aux gaz nocifs, ils comprennent le CO, divers Composés Organiques Volatils (COV), ainsi que des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), parmi lesquels le benzo-(a)-pyrène est le plus dangereux.

1.3.2 La combustion des déchets

Les déchets urbains sont brûlés dans des incinérateurs, tandis que les déchets agricoles, forestiers et industriels sont brûlés dans des chaudières. On cumule ici des polluants analogues à ceux du bois (souvent dans de mauvaises conditions) et ceux qui proviennent d'autres matières, comme les composés chlorés, qui donnent une

grande variété de polluants gazeux, les dioxines en particulier.

1.3.3 La combustion des liquides et gaz

Il s'agit des biocarburants, qu'ils soient liquides comme l'éthanol ou le biodiesel, ou gazeux comme le biométhane. Ce dernier engendre peu de polluants atmosphériques, pourvu qu'il ait été correctement purifié avant la combustion. L'éthanol est la source de polluants oxygénés (oxydes de soufre et d'azote, aldéhydes) qui sont à l'origine de la formation de O₃ par le biais d'une réaction photochimique. Quant au biodiesel, il est la source de particules fines, comme le gazole d'origine pétrolière.

1.4. Des situations complexes, mais un bilan sanitaire très lourd

Les estimations situent entre 2 et 4 millions le nombre de décès causés chaque année, au niveau mondial, par la pollution atmosphérique due à la biomasse-énergie. C'est un impact sanitaire considérable, qui est sans doute analogue à celui du charbon, mais probablement bien supérieur à celui du gazole et du fioul. Dans de nombreuses grandes agglomérations, la pollution de l'air, qui peut être extrême, n'est pas due surtout à la biomasse, mais elle résulte plutôt de la combustion de charbon et de produits pétroliers pour la production d'électricité, le chauffage et les transports. Quatre cas vont être détaillés ci-dessous : la cuisson dans les pays pauvres du Sud, le chauffage au bois dans les pays développés, les incinérateurs d'ordures ménagères, et les biocarburants.

2. La cuisson dans les pays pauvres du Sud

Dans ces pays, la majeure partie de la cuisson est effectuée avec de la biomasse. En Asie, 86 % de la biomasse-énergie est utilisée de cette façon, et 71 % en Afrique. Il s'agit le plus souvent de bois collecté dans un rayon d'une dizaine de km autour du logement, souvent par les femmes et les enfants, qui y consacrent une bonne part de leur temps. On utilise aussi du charbon de bois, plutôt dans les villes, et des déchets agricoles produits localement, comme la bouse de vache

ou de lama séchée.

Le combustible est le plus souvent brûlé en foyer ouvert, comportant trois pierres constituant un trépied, situé à l'extérieur ou à l'intérieur de l'habitation. Le rendement énergétique est toujours très faible, entre 5 et 8 %, ce qui entraîne une consommation exagérée de combustible. Il faut remarquer que, outre la cuisson, une partie de la pollution provient du chauffage, très sommaire, mais nécessaire dans certaines régions montagneuses.

2.1 Les pollutions

Pour des raisons qui sont maintenant bien comprises, à savoir des foyers ouverts et de la biomasse de mauvaise qualité, ce mode de cuisson engendre une très forte pollution de l'air, surtout à l'intérieur des habitations, mais aussi à l'extérieur, à proximité des foyers. De nombreuses études ont été effectuées dans tous les continents sous l'égide de l'OMS ou par K. R. Smith et ses collaborateurs, de l'université de Californie. À titre d'exemple, en Inde, en prenant comme référence la pollution engendrée par la cuisson d'un repas en utilisant le gaz de pétrole liquéfié (GPL), il apparaît que la cuisson au bois engendre environ 20 fois plus de polluants (particules fines, CO, COV), et que les mauvais combustibles, comme les résidus agricoles et les bouses séchées, en émettent près de 100 fois plus (Smith, 2006). À l'intérieur des logements, la pollution est particulièrement forte en saison froide, car la ventilation est très réduite. La concentration de particules atteint entre 10 et 100 fois les valeurs considérées comme des maximums admissibles. Le monoxyde de carbone est aussi très présent, de même que de nombreux COV et des HAP (Bruce *et al.*, 2000).

2.2 Les effets sanitaires

L'OMS a chiffré l'impact sanitaire à près de 2 millions de morts chaque année. Il s'agit surtout de femmes et d'enfants, qui sont exposés longuement et quotidiennement à des fumées et à des gaz toxiques, sources de maladies variées. L'impact le plus sévère est la broncho-pneumopathie chronique obstructive (BPCO), responsable de 54 % des décès, chez des adultes, alors que 44 % sont imputables aux pneumonies, surtout chez les enfants. Les autres affections concernent les voies respiratoires (asthme, tuberculose (co-facteur), cancers des voies respiratoires), le système cardio-vasculaire, la vision (cataracte),

ainsi que les allergies. La pollution par le CO est à l'origine d'un déficit pondéral à la naissance des enfants.

2.3 Comment améliorer la situation ?

L'utilisation de foyers améliorés peut faire gagner sur deux tableaux : une meilleure efficacité énergétique et une pollution réduite. Ces foyers sont maintenant proposés par divers programmes des organismes internationaux ou d'ONG¹. Citons ainsi le travail effectué par l'ONG française GERES pour l'utilisation de foyers améliorés au Cambodge. Mais le gain énergétique n'est que de 30-40 % (comme on part de 6 % de rendement, celui-ci est amené à 8 %, ce qui reste bien faible).

Une autre piste, c'est l'utilisation de meilleurs combustibles : charbon de bois, biogaz, GPL. Le problème ici, c'est le coût de ces combustibles. La question de l'accès au combustible ne peut être négligée. Pour disposer de bois de meilleure qualité, certains pays ont mis en œuvre des aires forestières protégées, ou effectué des plantations d'espèces à croissance rapide.

Notons que, en ce qui concerne les pays pauvres, la pollution et ses effets sur la santé sont pratiquement les mêmes, que l'on utilise du charbon ou de la biomasse.

3. Le chauffage au bois

Dans les pays développés, la biomasse-énergie, sous forme de bois, est essentiellement utilisée pour le chauffage (*Pollution atmosphérique*, 2009 ; *Wikipédia*, 2013). Les fumées émises par les poêles, les cuisinières à charbon ou à bois et les cheminées contiennent des particules fines d'un diamètre de l'ordre du micron, des composés non volatils comme les goudrons, et de nombreux composés volatils : NOx, CO, COV, HAP, dont certains sont cancérogènes comme le formaldéhyde et certains HAP, en particulier le benzo-a-pyrène (2, 3, 8, 10).

3.1 Chauffage domestique : chauffage au bois et pollution atmosphérique

Trois modes de chauffage au bois peuvent être distingués (*Wikipédia*, 2013) :

- la cheminée à foyer ouvert, très répandue (en France, 40 % des habitations en disposent), utilisée essentiellement comme chauffage d'appoint ou d'agrément, après avoir constitué le mode de chauffage et de cuisson quasi généralisé. Son rendement énergétique est d'environ 10 %. Ce mode de chauffage cumule la pollution associée à la mauvaise combustion du bois (particules et COV qui partent par la cheminée) et l'émission de gaz à l'intérieur de l'habitation (CO et COV) ;
- le poêle à bois, utilisé exclusivement pour le chauffage ou, sous la forme de cuisinière, pour la cuisson également. Il est souvent en fonte, parfois en pierre (stéatite). Il permet un bon rendement énergétique et une pollution réduite ;
- les chaudières permettent un chauffage collectif de logements ou d'équipements collectifs, grâce à un réseau de chaleur. Ce mode de chauffage est le moins polluant, pour plusieurs raisons : des chaudières à haut rendement, la capacité d'un entretien régulier, un fonctionnement automatisé qui évite les à-coups à faible rendement, et enfin la rentabilité de systèmes de dépollution des fumées.

La qualité de la combustion du bois, et donc la pollution atmosphérique qu'elle engendre, dépend de plusieurs facteurs : la forme du bois (bûches, plaquettes forestières, ou pellets formés de sciure agglomérée), le degré de séchage, et l'espèce d'arbre (feuillus durs ou tendres, résineux).

3.2 Bilan global

En matière de pollutions et d'effets sanitaires, la situation comporte de nombreux paramètres. Quoi qu'il en soit, à l'heure actuelle, le chauffage au bois contribue fortement à la pollution atmosphérique. Selon les chiffres du Citepa (Citepa, 2013), pour la France en 2010, la combustion du bois, toutes conditions confondues, ne contribue que pour 3,5 % à notre consommation d'énergie, mais à 69 % des émissions de HAP, à 62 % des PM1,0, à 35 % du CO, et à 22 % des COV. C'est donc une contribution très importante à la pollution de l'air extérieur, et il est probable que le chauffage au bois contribue aussi fortement à la pollution de l'air intérieur.

Le bilan sanitaire est sans doute en relation mais il est difficile à établir. Partant de données épidémiologiques et expérimentales, il faudrait évaluer le degré d'exposition de différentes catégories de population, puis en évaluer l'impact sanitaire. Or les pollutions dues à la combustion de biomasse ont des points communs avec celles dues au transport routier, aux activités agricoles et industrielles, et les maladies induites sont partiellement les mêmes. Les résultats comportent donc une grande part d'incertitude (Commissariat général du développement durable, 2012 ; INVS, 2013). Les effets concernent les voies respiratoires (à court terme, de l'asthme et des réactions inflammatoires ; à long terme, la BPCO et le cancer du poumon) et le système cardio-vasculaire (à court et long termes) (Naeher *et al.*, 2007 ; Orosco-Levi *et al.*, 2006 ; Annesi-Maesano et Dab, 2006 ; Hoek *et al.*, 2013 ; Masse et Boudène, 2013). Les effets de la pollution urbaine ont été particulièrement étudiés par le projet Aphekom (Aphekom, 2012).

Un rapport de la Commission des comptes et de l'économie de l'environnement (Commissariat général du développement durable, 2012) fournit une analyse complète, au niveau de la France, des relations entre la santé et la pollution de l'air. Il en chiffre les coûts sanitaires en termes de mortalité prématurée et de morbidité, c'est-à-dire des états de mauvaise santé. Il en chiffre aussi les coûts collectifs, qui sont considérables : 20 à 30 milliards € par an, toutes pollutions confondues. Une étude européenne a été effectuée sous le signe de « Clean Air For Europe » (European commission DG Environment, 2005).

3.3 Les actions à entreprendre

Deux facteurs sont déterminants pour réduire la pollution : l'utilisation de foyers efficaces et le traitement des fumées. Ces mesures sont facilement mises en oeuvre dans le cas de grosses chaufferies collectives associées à des réseaux de chaleur pour le chauffage des logements ou la chaleur industrielle. Au niveau du chauffage individuel au bois, qui est souvent de mauvaise qualité, des progrès peuvent être faits avec les inserts, les chaudières modernes, et même le traitement des fumées, bien que celui-ci soit onéreux. Des mesures réglementaires visent à interdire les feux en plein air (feux agricoles, brûlage des déchets verts) et à interdire les cheminées à foyer ouvert.

Un travail d'éducation doit viser à lutter contre l'idée simpliste que le chauffage au bois « est bon pour la planète » et faire comprendre aux habitants tout à la fois l'ampleur des risques, la raison de ceux-ci, et la nature des mesures préventives à prendre. Comme thème éducatif, il faut penser à la qualité du combustible. Il faut utiliser du bois propre et sec, et il faut que la présentation de celui-ci (bûches, plaquettes forestières, pellets) soit adaptée au foyer.

Les mesures peuvent être rassemblées dans des plans, comme le plan Particules national, les plans régionaux (PRQA, Plan Régional pour la Qualité de l'Air) ou des plans locaux, à l'exemple du Plan de protection de l'atmosphère de la vallée de l'Arve. Des mesures incitatives peuvent aussi porter sur le chauffage urbain par un réseau de chaleur provenant de chaudières efficaces, couplées à un système de dépollution des fumées.

4. Les incinérateurs

Parmi les valorisations énergétiques des déchets ménagers ou assimilés, l'incinération est une voie utile, même si elle est parfois décriée sur la base d'études anciennes. Il s'agit de faire brûler les déchets, ce qui fournit de la chaleur utilisée pour produire de l'électricité et pour approvisionner un réseau de chaleur, en cogénération. Cette solution s'intègre dans une stratégie d'ensemble qui établit des priorités dans la gestion des déchets : d'abord en réduire la quantité à la source, puis les trier, avec comme objectif prioritaire une valorisation matière, puis des valorisations énergétiques (incinération pour les déchets secs, méthanisation pour les déchets humides), production de compost, et finalement mise en décharge. En France, l'incinération valorise 37 % des déchets, comme le font de nombreux pays européens, parmi les plus soucieux de l'environnement. La production énergétique française est de 1,3 Mtep/an.

4.1 Les risques des incinérateurs anciens

Plusieurs études ont démontré que les fumées émises par les incinérateurs anciens contenaient des polluants atmosphériques, essentiellement des métaux lourds (mercure, plomb, cadmium), des polychlorobiphényles (dont de nombreuses dioxines), des HAP et des particules d'imbrûlés. Ces polluants restaient partiellement dans l'air, et ils étaient inhalés par les habitants vivant autour

de l'incinérateur. Une partie des polluants, tombant au sol, ont imprégné les sols et les végétaux, engendrant une contamination des populations, directement par la consommation de produits végétaux pollués, ou plus souvent par le biais des animaux qui se sont nourris de végétaux contaminés (lait, oeufs, viande). Des études épidémiologiques conduites autour de ces incinérateurs ont indiqué la possibilité d'un excès de certaines formes de cancers associées à ces pollutions (voir la discussion dans : Zmirou-Navier, 2009 ; Health Protection Agency, 2009).

Il faut remarquer que les incinérateurs d'ordures ménagères traitent des déchets qui relèvent de la biomasse (divers déchets alimentaires, animaux et végétaux) et environ autant de produits qui ne sont pas de la biomasse, comme des matières plastiques. Il est tout à fait probable que les émissions de métaux lourds et de composés organiques chlorés, en particulier les dioxines, proviennent de ces derniers et non pas de la biomasse (sauf les bois souillés).

4.2 Des incinérateurs modernes beaucoup moins polluants

Des directives européennes ont imposé des règles strictes pour les émissions des incinérateurs (UE), émissions de dioxines, de furannes, de particules et de mercure (Communautés européennes, 2010). Les installations créées depuis l'année 2000, approximativement, répondent à ces exigences par deux moyens techniques : une combustion plus complète, à plus haute température, qui émet moins de particules et d'hydrocarbures ; et une épuration très poussée des fumées. La combustion à haute température engendre des émissions de NOx, mais celles-ci restent inférieures à 1 % des émissions françaises. La tendance est aussi à la construction d'incinérateurs de plus grande taille, mieux à même d'effectuer une combustion efficace et d'être dotés d'un système performant de traitement des fumées.

Aux dires des experts (Zmirou-Navier, 2009 ; Health Protection Agency, 2009), il apparaît que les incinérateurs modernes émettent des polluants atmosphériques en quantité extrêmement faible, qui n'en font pas un problème de santé publique, quelle que soit leur localisation. Il convient quand même d'être prudent et de contrôler les émissions, car les chaudières et les filtres peuvent se dérégler, engendrant des émis-

sions excédentaires par rapport aux normes. Il faut aussi remarquer que les déchets, en dépit des règlements, sont fréquemment exportés vers des pays dont les normes d'émission sont bien plus laxistes que les nôtres.

Au plan énergétique, il est probable que les bois souillés constitueront une ressource importante à l'avenir (3-5 Mtep/an en France). En matière de pollution atmosphérique, leur problématique est semblable à celle des déchets ménagers, avec des émissions de métaux lourds et de composés organiques halogénés qu'il conviendra de limiter très fortement.

5. Les biocarburants

5.1. Comment se posent les problèmes ?

Comme source d'énergie, les transports utilisent presque uniquement des produits pétroliers, essence et gazole. En termes de pollution, le problème essentiel est bien entendu l'émission de CO₂, dont les transports émettent 36 % à l'échelon national. Mais les moteurs sont la source d'autres pollutions atmosphériques dont l'impact sanitaire est tout à fait sérieux. Il y a, en premier lieu, les particules fines des moteurs diesel, dont le caractère cancérigène a été reconnu. Depuis que le plomb a été banni des carburants, les polluants non particuliers dangereux sont les NOx, qui sont émis plutôt par les moteurs à essence et qui sont à l'origine de la formation d'ozone.

Le remplacement de carburants pétroliers par des biocarburants est supposé diminuer les émissions de CO₂. En fait, la question est fortement débattue et, sans entrer dans toutes les controverses, il faut dire que le bilan n'est pas merveilleux. Qu'en est-il des autres polluants atmosphériques : les biocarburants sont-ils meilleurs que les carburants pétroliers ?

5.2 Remplacement de l'essence par de l'éthanol

L'éthanol est largement employé au Brésil et aux USA. Une étude (Jacobson, 2007) a montré que l'introduction d'éthanol, en mélange avec l'essence, pouvait entraîner une émission accrue de NOx, et donc de la formation d'ozone, avec des conséquences sanitaires substantielles (mortalité, asthme). Les émissions de NOx pourraient

être réduites, mais les aldéhydes et le nitrate de peroxyacétyle, un irritant oculaire, pourraient augmenter. Ces questions auront besoin d'être mieux étudiées.

5.3 Remplacement du gazole par le biodiesel

L'importance présumée des risques sanitaires dus aux moteurs diesel pourrait faire espérer une amélioration avec le biodiesel. Les études sont encore peu nombreuses, mais il semble bien que les espoirs soient déçus. Une revue de 2012 conclut que les avantages sont équilibrés par des contreparties, sauf lorsque de l'éthanol (!) est ajouté au mélange gazole-biodiesel (Kannan et Anand, 2012). Une étude canadienne conclut que l'incorporation de 5 % ou 20 % de biodiesel dans le gazole ne mènera qu'à des bénéfices très minimes ou nuls sur la qualité de l'air et la santé, et que ceux-ci diminueront vraisemblablement dans le temps, même s'il subsiste des incertitudes importantes au niveau des données et de la modélisation (Santé Canada, 2012).

5.4 Remplacement de l'essence ou du gazole par le bio-GNV

L'utilisation de Gaz Naturel Véhicule (GNV) engendre de très faibles émissions de particules. À l'avenir, certains projets envisagent de remplacer le GNV d'origine fossile par son équivalent obtenu à partir de biomasse, le bio-GNV. Ce dernier serait produit par méthanisation de biomasse humide ou par gazéification thermo-chimique de bois, fournissant un gaz de synthèse soumis ensuite à une réaction de méthanation. L'usage de bio-GNV constituerait un progrès important en termes d'émission de particules, surtout s'il se fait en remplacement de gazole (MEDDE, 2011).

5.5 Les biocarburants de la filière ligno-cellulosique

Les biocarburants actuels, parfois appelés agrocarburants, sont produits à partir de denrées alimentaires. Des recherches sont activement poursuivies pour produire des carburants à partir de bois ou de paille, c'est-à-dire des matériaux ligno-cellulosiques. Si elles aboutissent, elles

inciteront sans doute à cultiver des arbres d'une manière intensive (saule, peuplier, etc.), suivant la méthode dite des taillis à courte rotation ou TCR, sur de grandes surfaces occupées actuellement par des graminées comme les céréales ou les herbes de prairies. Il se trouve que ces arbres sont des espèces dites « à larges feuilles » alors que les graminées sont à feuilles étroites, et qu'ils émettent plus d'un hydrocarbure gazeux, l'isoprène. Dégagé dans l'air, celui-ci est susceptible de réagir avec l'oxygène pour former de l'ozone, qui est un poison pour les animaux et pour les végétaux. Des chercheurs ont évalué quel pourrait être l'impact de larges surfaces de TCR sur la formation d'ozone troposphérique, et sur ses conséquences sur la santé humaine et sur la production des cultures (Ashworth *et al.*, 2013). Sur la base de 72 Mha de TCR, l'effet en Europe pourrait être une mortalité de 1 530 personnes/an, et la production de blé pourrait chuter de 5,5 Mt. Ces estimations sont très hypothétiques à bien des égards, mais il faut les conserver en mémoire en cas d'un fort développement des cultures de TCR.

Conclusion

En prenant connaissance de tous les impacts négatifs sur la santé des usages énergétiques de la biomasse, on pourrait souhaiter rejeter cette forme d'énergie, alors qu'elle est considérée généralement comme renouvelable et utile à la transition énergétique. Plus de deux millions de morts prématurées chaque année et une morbidité considérable, cela place cette énergie au même niveau que le charbon dans son bilan sanitaire. Et pourtant, l'examen de tous les problèmes montre que des progrès considérables peuvent être effectués. Pour cela, les mots d'ordre sont : une combustion efficace, à haute température, grâce à des foyers performants ; et un bon traitement des fumées. Cela coûtera de l'argent et prendra du temps. Des solutions pourront être trouvées assez aisément dans les régions à haut revenu. La question la plus inquiétante est certainement celle de la combustion pour la cuisson, dans les pays pauvres, là où les moyens manquent pour mettre en œuvre les deux facteurs de progrès.

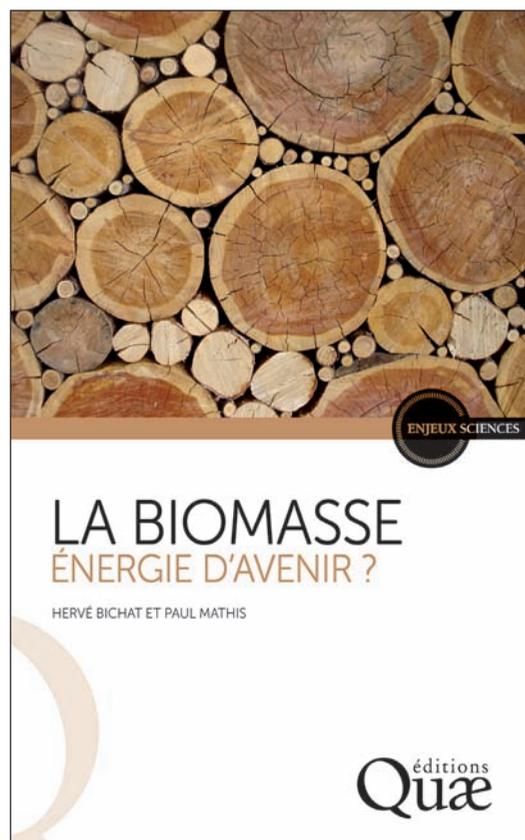
1. <http://www.cleancookstoves.org/> ou <http://www.geres.eu/fr/diffusion-de-foyers-de-cuisson-domestiques-ameliores-au-cambodge>

Références

- Annesi-Maesano I., Dab W. (2006). Pollution atmosphérique et poumon. Approche épidémiologique. *Médecine/Sciences*, n° 22, p. 589-594.
- Aphekom. (2012). Improving Knowledge and Communication for Decision Making on Air Pollution and Health in Europe. [En ligne]. Disponible sur : http://www.aphekom.org/c/document_library/get_file?uuid=5532fafa-921f-4ab1-9ed9-c0148f7da36a&groupId=10347
- Ashworth K., Wild O., Hewitt C.-N. (2013). Impacts of biofuel cultivation on mortality and crop yields. *Nature Climate Change*, n° 3, p. 492-496.
- Bichat H., Mathis P. (2013). *La biomasse, énergie d'avenir ?* Versailles, Quae, 225 p.
- Bruce N., Perez-Padilla R., Albalak R. (2000). Indoor air pollution in developing countries: a major environmental and public health challenge. *Bull. World Health Organization*, n° 78, p. 1078-1092.
- CITEPA. (2013). *Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France*. Séries sectorielles et analyses étendues. Rapport national. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.citepa.org/fr/inventaires-etudes-et-formations/inventaires-des-emissions/secten>
- Commissariat général du développement durable. (2012). *Rapport de la commission des comptes et de l'économie de l'environnement. Santé et qualité de l'air extérieur*. Références, juillet, p. 1-100.
- Communautés européennes. (2010). Directive n° 2010/75/UE du 24/11/10 relative aux émissions industrielles. [En ligne]. Disponible sur : <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:334:0017:0119:fr:PDF>
- European commission DG Environment. (2005). Cost-Benefit Analysis of Policy Option Scenarios for the Clean Air for Europe programme. [En ligne]. Disponible sur : http://www.cafe-cba.org/assets/thematic_strategy_analysis_v3.pdf
- Health Protection Agency. (2009). The impact on health of emissions to air from municipal waste incinerators. [En ligne]. Disponible sur : http://www.hpa.org.uk/webc/HPAwebFile/HPAweb_C/1251473372218
- Hoek G., Krishnan R.M., Beelen R. *et al.* (2013). Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: a review. *Environmental Health*, n° 12, p. 43-49.
- Institut National de Veille Sanitaire. (2013). Pollution de l'air et effets sur la santé. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.invs.sante.fr/Dossiers-thematiques/Environnement-et-sante/Pollution-de-l-air-et-effets-sur-la-sante>
- Jacobson M.Z. (2007). Effects of Ethanol (E85) versus Gasoline Vehicles on Cancer and Mortality in the United States. *Environ. Science & Technol.*, n° 41, p. 4150-4157.
- Kannan G.R., Anand R. (2012). Biodiesel as an alternative fuel for direct injection diesel engines: a review. *J. Renew. Sustain. Energy*, n° 4, <http://dx.doi.org/10.1063/1.3687942>
- Kocbach Bolling A., Pagels J., Espen Yttri K., *et al.* (2009). Health effects of residential wood smoke particles; the importance of combustion conditions and physico-chemical particle properties. *Particle and Fibre Toxicology*, n° 6, p. 29, doi:10.1186/1743-8977-6-29.
- Lin H.-H., Murray M., Cohen T., *et al.* (2008). Effects of smoking and solid-fuel use on COPD, lung cancer, and tuberculosis in China: a time-based, multiple risk factor, modelling study. *The Lancet* n° 372, p. 1473-1483.
- Masse R., Boudène C. (2013). Des toxiques au coin du feu : données récentes sur l'impact sanitaire des fumées de bois. *Bull. Acad. Natle. Méd.*, n° 197, p. 187-190.
- MEDDE. (2011). Le développement des véhicules utilisant le gaz naturel. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Le-Gaz-Naturel-pour-Vehicules-GNV.html>
- Naeher L.P., Brauer M., Lipsett M., *et al.* (2007). Woodsmoke health effects: a review. *Inhalation Toxicology*, n°19, p. 67-106.
- Organisation mondiale de la santé. (2011). Pollution de l'air à l'intérieur des habitations. [En ligne]. Aide-mémoire n° 292. Disponible sur : <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs292/fr/index.html>
- Orosco-Levi M., Garcia-Aymerich J., Villar J., *et al.* (2006). Wood smoke exposure and risk of chronic obstructive pulmonary disease. *Eur. Respir. J.*, n° 27, p. 542-546.
- *Pollution atmosphérique*, Numéro spécial « Le bois énergie. Enjeux écologiques et de santé environnementale. Mars 2009.
- Santé Canada. (2012). Évaluation des risques pour la santé humaine liés à la production, la distribution et l'utilisation du biodiesel au Canada. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/air/biodiesel-fra.php>

- Smith K.R. (2006). Impacts sur la santé de l'utilisation domestique du bois de feu dans les pays en développement. *Unasylva*, n° 57, p. 41-44.
- Wikipédia. (2013). Bois énergie. [En ligne]. Disponible sur : http://fr.wikipedia.org/wiki/Bois_%C3%A9nergie
- Zmirou-Navier D. (2009). Incinération des ordures ménagères en France. Numéro thématique du *Bulletin épidémiologique hebdomadaire*, InVS, n° 7-8, p. 57-76.

Bichat H., Mathis P. La biomasse, énergie d'avenir ? 2013, Éditions Quæ, Collection Enjeux sciences, 232 pages



Fruit de la photosynthèse des plantes, la biomasse occupe une place centrale dans les grands équilibres planétaires. Elle constitue une ressource essentielle pour les humains, leur fournissant de quoi se nourrir et contribuant à les pourvoir en matériaux et en énergie.

La biomasse-énergie est à la fois ancestrale et moderne. Avec ses trois sources (la forêt, les cultures et les déchets), elle est limitée par la capacité de production des sols et par sa compétition avec les autres usages de la biomasse (l'alimentation, la chimie et les matériaux).

La production énergétique mondiale est entrée dans une phase de transition imposant de réduire fortement dans l'avenir notre consommation d'énergies fossiles, sources de gaz à effet de serre et dont la ressource n'est pas inépuisable. Charbon, pétrole et gaz doivent progressivement être remplacés. La biomasse pourra-t-elle participer à cette transition énergétique et répondre aux besoins croissants de l'humanité en énergie ?

Bioremédiation des sols et des eaux : application aux pollutions chimique et nucléaire

Bioremediation of soil and water: application to chemical and nuclear pollutions

Alain VAVASSEUR¹

Directeur de recherche à l'Institut de Biologie Environnementale et de Biotechnologies au CEA de Cadarache

Résumé

La bioremédiation est une branche des biotechnologies qui utilise des mécanismes biologiques naturels ou détournés pour traiter des problèmes environnementaux. Les agents biologiques utilisés peuvent être de simples molécules organiques, comme de l'ADN ou des anticorps, ou bien des organismes vivants ou morts (bactéries, microalgues, champignons, algues et plantes supérieures). La phytoremédiation consiste plus spécifiquement à utiliser des plantes pour décontaminer des sols, des eaux ou de l'air pollués.

Contrairement aux polluants organiques tels que les PCB², TNT³, TCE⁴, qui peuvent être métabolisés par les micro-organismes du sol ou les racines des plantes, les radionucléides — comme la plupart des métaux lourds — ne peuvent être dégradés, mais leur spéciation peut être modifiée et, par ce fait, leur biodisponibilité et leurs effets sur l'environnement. Ainsi, les stratégies de bioremédiation concernant les radionucléides vont consister en :

- leur stabilisation/minéralisation afin de diminuer leur biodisponibilité grâce à un changement de leur état redox ;
- pour les sols, leur extraction, en utilisant les mécanismes nutritifs des plantes ;
- pour les solutions polluées, leur extraction, en utilisant les propriétés de « piège à cations » des parois végétales.

En comparaison des méthodes physico-chimiques utilisées classiquement pour décontaminer les sols, mais qui conduisent à leur déstructuration et à une forte diminution de leur fertilité et de leur productivité, la bioremédiation est considérée comme une technique respectueuse de l'environnement. Un atout important de cette technique est également son coût, bien inférieur à celui des techniques traditionnelles de décontamination. Par contre, la bioremédiation ne peut être appliquée dans l'urgence, car les durées de traitement s'étalent sur plusieurs années — voire décennies — en fonction du degré de pollution. Les recherches actuelles portent donc essentiellement sur l'optimisation de ce temps de traitement.

Nous présentons dans cet article différents exemples de bioremédiation *in situ* des métaux lourds et des radionucléides, et nous débattons en conclusion les aspects négatifs et positifs de cette technique.

Mots-clés

Décontamination des sols, bioremédiation, phyto-extraction, phytostabilisation, rhyzofiltration.

Abstract

Bioremediation is a branch of biotechnology that uses natural or diverted biological mechanisms to address environmental problems. The biological agents can be simple organic molecules, such as DNA or antibodies, or live or dead organisms (bacteria, microalgae, fungi, higher algae and plants). Phytoremediation refers more specifically to using plants to decontaminate polluted soil, water, or air.

Unlike organic pollutants such as PCBs¹, TNT², TCE³, which can be metabolized by soil microorganisms and plant roots, radionuclides — like most heavy metals — cannot be degraded. Thus, bioremediation strategies for radionuclides will consist into:

- stabilization/mineralization to reduce their bioavailability through a change in their redox state;
- for soil, their extraction using the plant nutrition mechanisms;
- for polluted solutions, their extraction using the “cation traps” properties of plant cell walls.

Compared to physicochemical methods conventionally used to decontaminate soils but which lead to a sharp decline in fertility and productivity, bioremediation is considered a friendly environmental technology. An important advantage of this technique is its cost, much lower than traditional remediation techniques. By cons, bioremediation cannot be applied in an emergency, because processing times are spread over several years — even decades — depending on the degree of pollution. Therefore current research focuses on optimizing the processing time.

We present in this paper several examples of in situ bioremediation of heavy metals and radionuclides, and we discuss in conclusion the negative and positive aspects of this technique.

Keywords

Soil decontamination, bioremediation, phyto-extraction, phytostabilization, rhizofiltration.

Dans les relations entre la production d'énergie nucléaire et la santé, les plantes jouent un rôle essentiel. Leurs affinités avec les radioéléments peuvent avoir des répercussions sur la chaîne alimentaire, mais les plantes ont aussi d'autres propriétés tout à fait intéressantes. C'est pourquoi nous avons voulu donner la parole à Alain VAVASSEUR pour montrer pourquoi le CEA est impliqué dans ce domaine. Bioremédiation, phytoextraction, rhizofiltration, phytovolatilisation, phytostabilisation : autant de termes dont il a accepté de nous donner les définitions, non sans esquisser quelles pourront être leurs applications actuelles et futures :

La phytostabilisation (*cf.* § 4) vise à maintenir un couvert végétal pour empêcher l'érosion et la dispersion par le vent, ainsi que le lessivage des sols.

La rhizofiltration (*cf.* § 5) utilise l'affinité des racines pour concentrer les microéléments, comme l'uranium.

La phytoextraction (*cf.* § 3) met en œuvre l'accumulation par les plantes des éléments toxiques, tandis que la phytovolatilisation (*cf.* § 6) permet de disperser les éléments volatils dans l'air par évapotranspiration par les feuilles.

Bioremédiation des sols et des eaux : application aux pollutions chimique et nucléaire

Avant-propos : la problématique de Fukushima

Un congrès s'est tenu à Koriyama, dans la province de Fukushima, en mars 2012, pour exposer les premiers retours d'expérience de décontamination et programmer les mesures à prendre désormais.

Le césium est le principal radiocontaminant, mais il pénètre peu dans le sol, donc les premières mesures agricoles vont être d'araser une couche de terre de 5 à 10 cm, puis de labourer profondément pour enfouir la contamination restante, et enfin procéder à un amendement potassique important pour créer une compétition entre le césium et le potassium.

Si l'on considère que la surface impactée est de l'ordre de 1 800 km² et qu'on veut éliminer 5 cm de sol pour limiter le débit de dose à 6 mSv/an (un niveau au-dessus des normes européennes actuelles), cela conduit à évacuer quelque 100 millions de m³ de terre contaminée en radiocésiums 137 et 134, que l'on devra ensuite stocker : on voit les limites de cette approche quand il s'agit de grandes surfaces.

D'où la nécessité de rechercher des techniques biologiques compatibles avec le milieu naturel.

1. La bioremédiation : présentation des technologies existantes

En complément de l'approche mécanique et physico-chimique, il est possible de faire intervenir des êtres vivants, des bactéries ou des plantes : c'est ce qu'on appelle la bioremédiation.

Certaines bactéries précipitent et fixent l'uranium en leur périphérie. C'est le cas de *Geobacter metallireducens* dont la répartition de l'uranium à la valence IV en périphérie de la cellule est révélée aux rayons X (Cologgi *et al.*, 2011). En concentrant le métal ou en le précipitant par réduction chimique, ce qui réduit sa biodisponibilité, les bactéries servent à dépolluer les liquides (voir § 2).

Comme les atomes radioactifs ne sont pas

dégradables, on peut se servir des plantes soit pour les extraire du sol, quand il s'agit d'atomes à longues périodes radioactives, soit pour les y fixer en attendant leur décroissance radioactive.

Par rapport aux techniques physico-chimiques, les techniques de remédiation biologique sont mises en œuvre *in situ* avec un impact moindre sur l'environnement. Elles peuvent ainsi traiter de larges espaces faiblement contaminés, elles diminuent l'érosion par le vent et le ruissellement, elles préservent la fertilité des sols, ainsi que le paysage. Leur coût est modéré, généralement de 10 à 100 fois inférieur aux techniques classiques ; néanmoins celui-ci demanderait à être évalué en intégrant le coût de l'immobilisation du site qui, pendant la durée (parfois longue) du traitement ne peut généralement pas être utilisé (sauf pour des cultures particulières, voire des champs d'installations solaires) ; elles sont généralement bien acceptées par le public en tant que « technologie verte », et peuvent être étalées dans le temps. Enfin, le recyclage de la biomasse, en matériaux ou combustible, contribue à diminuer le coût de la réhabilitation des sols et à recréer de l'emploi dans les zones où l'agriculture est impactée par la pollution. (Dans le cas d'une combustion, il faut bien sûr prendre soin de traiter les fumées, qui concentrent alors la contamination).

2. La bioremédiation par les bactéries

Dans le cas de métaux lourds toxiques, les phénomènes de biotransformation mis en jeu incluent : chimisorption renforcée par les microbes, biosorption, bioaccumulation, biominéralisation. Les bactéries couramment utilisées sont : *Geobacter metallireducens*, *Geobacter sulfurreducens*, *Shewanella oneidensis*, *Desulfotomaculum reducens* ou *Thermoterrabacterium ferrireducens*.

Les bactéries peuvent être utilisées pour adsorber l'uranium soluble dans l'eau à la valence VI, mais on peut aussi utiliser des bactéries capables de réduire l'uranium (VI) à la valence IV, provoquant une précipitation de l'uranium qui n'est alors plus biodisponible. Ce transfert d'électrons mettant en jeu un autre élément métallique (soufre ou fer, par exemple) constitue un phénomène métabolique dont la bactérie tire de l'énergie.

On peut précipiter par des bactéries l'uranium, le plutonium, le technétium, le palladium et d'autres éléments. On voit dans le cytoplasme de la bactérie *Pseudomonas CRB5*, des granules d'uranium associées à des polyphosphates, dont l'uranium est très affiné. Pour une eau contaminée avec de l'uranium à 200 mg/L, la décontamination est quasi terminée au bout d'une centaine d'heures, notamment en conditions aérobies, avec des systèmes simples ne requérant pas d'énergie (McLean et Beveridge, 2001).

De même, la radiographie montre l'accumulation de technétium (après réduction) dans la paroi de la bactérie *Shewanella oneidensis*. Avec d'autres bactéries, on obtient des formations pariétales d'uranium complexé par des phosphatases, ou de palladium réduit à la paroi d'une cellule sulfato-réductrice (Lloyd *et al.*, 1999).

On arrive même ainsi à former des structures cristallines d'uranium.

Comment utiliser ces propriétés ?

On sait de mieux en mieux confiner les bactéries ou les microalgues dans des supports : soit des mousses, des verres frittés, des porcelaines, de façon à les intégrer dans un procédé industriel. C'est ainsi, par exemple, qu'en Afrique du Sud, on extrait de l'or par filtration à partir d'arsénopyrite.

On peut aussi utiliser les bactéries directement sur les sites miniers, soit pour récupérer l'uranium à très faible teneur par biolixiviation en utilisant des bactéries oxydantes qui le rendent soluble à la valence VI, soit pour fixer l'uranium avec des bactéries réductrices.

À Ashtabula (Ohio), pour traiter la nappe phréatique contaminée, des injections d'ester de polylactate ont été faites *in situ* pour augmenter l'activité d'une bactérie *Geobacter*, capable de réduire l'uranium (VI) en uranium (IV) et ensuite de l'immobiliser.

3. La phytoextraction

Puisque les radionucléides et les métaux ne sont pas dégradables, la rhizodégradation est exclue, et la phytoextraction des radionucléides et des métaux se limite à accumuler l'élément toxique dans la plante. Le rendement de la dépollution dépend étroitement de la quantité de

biomasse produite, multipliée par le coefficient de transfert (rapport entre la concentration du polluant dans le végétal et celle dans le sol).

Des plantes dites métalophages extraient de façon remarquable le cadmium ou le zinc, mais elles sont généralement de petite taille et de cycle lent, et ne conviennent donc pas à une exploitation industrielle.

Dans le cas du projet européen PhyLeS (pilot phytoremediation for environmental cleanup of lead polluted soils), qui consistait à traiter, en Italie, des terrains d'une ancienne fonderie fortement pollués au plomb (300 à 1 200 mg/kg), on a appliqué un traitement de chélation à l'EDTA au moment de la floraison. Le coefficient de phytoextraction par rapport au tournesol non traité a été multiplié par 90 en utilisant K2EDTA pour traiter *Brassica Juncea* cv. 426308 (le simple choix de *Brassica Juncea* – moutarde indienne – cv. 426308 fait gagner un facteur 6, et l'ajout de K2EDTA à 5 mmol/kg de terre sèche, encore un facteur 15). Dans ce cas, il faut tout de même une vingtaine d'années pour effectuer une phyto-rémediation complète.

Des essais pour dépolluer des sols contaminés en uranium ont été menés avec de la moutarde indienne (*Brassica juncea*) et de l'ivraie « ryegrass » (*Lolium perenne*). Utilisés seuls, ils ne dépolluent pas, mais en ajoutant de l'acide citrique avec la moutarde indienne ou un mélange acide citrique + bicarbonate avec l'ivraie, on atteint des facteurs de transfert de 8 et 5 respectivement. Il faut donc rechercher des plantes, comme le lupin, qui exsude par lui-même le citrate dans le sol. Pareillement, pour dépolluer du plutonium, il est possible d'ajouter du nitrate, meilleur que le citrate, mais l'ajout de DPTA (acide diéthylène triamine penta acétique, un décorporant humain) augmente encore les résultats d'un facteur 30 à 100. Il faut donc ajouter au sol les agents qui rendent biodisponibles pour la plante les éléments dont on veut dépolluer le sol.

En ce qui concerne le césium, qui est le polluant radiologique majoritairement répandu après un accident nucléaire, comme l'ont montré les catastrophes de Tchernobyl et de Fukushima, les mesures faites sur les territoires contaminés à la suite de l'accident de Tchernobyl ont montré que celui-ci ne migrait que lentement dans les sols, et que les végétaux le recyclaient, en l'incorporant par les racines et en le restituant au sol lors de la chute des feuilles.

Dans l'humus, le césium reste échangeable, tandis que dans l'argile (piège à cations), il est très fortement fixé, comme analogue du potassium. Le quinoa et la betterave à sucre présentent les meilleurs coefficients de transfert pour le césium, devant l'Atriplex sp. et l'ivraie (*Lolium perenne*). La culture doit donc être adaptée en fonction du sol pour maximiser le produit (biomasse x coefficient de transfert).

Dans le cas de Brookhaven (réacteur des États-Unis qui a présenté une fuite notamment de strontium et de césium), ont été testées l'amaranthe (*Amaranthus retroflexus*), la moutarde (*Brassica juncea*), le haricot (*Phaseolus acutifolius*). L'amaranthe permet d'obtenir les meilleurs coefficients de transfert pour le césium, avec une diminution de moitié en 15 ans, et elle offre une demi-décroissance du strontium en 6 ans (Fuhrmann *et al.*, 2002) (NB : la période radioactive du Sr-90 est de 29 ans, celle du Cs-137 est de 30 ans).

La biomasse ainsi chargée de contamination est ensuite traitée comme un déchet radioactif incinérable.

Notre laboratoire travaille en physiologie cellulaire et en biologie moléculaire pour essayer de comprendre les mécanismes qui interviennent dans le transfert vers la plante de métaux lourds ou radionucléides comme le cadmium ou le césium, le cobalt et l'uranium. Dans le cas du césium, nous étudions les transporteurs — de potassium essentiellement — qui normalement permettent la nutrition de la plante et participent à l'entrée de césium. Cette démarche permet d'obtenir des critères quantitatifs qui seront utilisés par la suite pour sélectionner et éventuellement transformer des plantes optimisées pour la phytoremédiation. La démarche commence par des études de génétique inverse : on sélectionne des plantes qui sont invalidées pour des gènes codant pour des transporteurs potassiques, et on observe si elles assimilent moins le césium.

On en déduit que ces transporteurs interviennent dans le processus, on peut alors sélectionner les plantes qui expriment plus ce transporteur, ou transformer des plantes pour qu'elles l'expriment plus. Comme modèle pour améliorer le facteur de décontamination, nous utilisons *Arabidopsis thaliana*, modèle de biologie moléculaire dont le génome est petit et la séquence d'ADN connue depuis l'an 2000, en effectuant un criblage de gènes impliqués dans l'absorption et

la translocation du césium.

Le laboratoire collabore également avec les équipes japonaises du Pr Tomoko Nakanishi (Univ. de Tokyo) qui font de l'imagerie isotopique, afin de suivre en temps réel le transfert de césium à partir des racines, en utilisant du potassium comme compétiteur : on voit qu'en présence de potassium, le transfert de césium est ralenti, alors que le césium est rapidement absorbé quand il n'y a pas de potassium. Le potassium est donc une contre-mesure efficace en cas de pollution par le césium.

La démarche suivie est donc : à partir d'études génétiques, identifier les marqueurs importants pour le transport de césium, et ensuite rechercher dans la biodiversité si certaines plantes expriment beaucoup ces transporteurs. S'offrent alors deux possibilités : soit la *safe food*, qui consiste à cultiver des plantes sur lesquelles on a réussi à supprimer les transporteurs impliqués dans la prise de césium, et permettre par exemple de faire pousser, sur des sols contaminés, du riz dont le grain est peu contaminé ; soit la phytoremédiation, dont le but est inverse, c'est-à-dire augmenter l'absorption de la contamination par les plantes.

4. La phytostabilisation

Le cas de la Combe du Saut, ancienne mine d'or fortement polluée à l'arsenic (11 millions de tonnes de stériles pollués), représente un exemple français qui n'est pas dans le domaine des radionucléides. Le site de cette mine, avec un flux d'arsenic de 1 300 kg/an qui s'écoulait vers la nappe phréatique, et un flux de 300 kg/an qui percolait vers la rivière, a été traité à la grenaille de fer qui retient l'arsenic, puis en plantant des espèces résistantes à l'arsenic, de façon à empêcher le ruissellement (programme DifPol-Mine de l'ADEME).

5. La rhyzofiltration

Une autre façon d'utiliser les plantes est la rhyzofiltration. Les racines des plantes constituent de véritables pièges à cations. Dans une expérience déjà ancienne, l'eau contaminée avec de l'uranium à 2 MBq/L est filtrée à travers des bassins successifs ; le premier bassin retient

déjà 97,7 % de l'uranium entrant, et il sort du 3^e bassin de l'eau épurée à 99,3 % (Timofeeva-Resovskaia, 1963).

Une technique de rhyzofiltration mettant en œuvre des radeaux flottants est utilisée dans la zone de Tchernobyl, permettant d'atteindre une concentration dans les racines d'un facteur 5 000 à 30 000 à pH 5.

La rhizodégradation utilise l'activité microbienne au niveau racinaire produisant des enzymes qui peuvent dégrader chimiquement les produits toxiques organiques, mais cela ne s'applique évidemment pas aux radioéléments.

6. La phytovolatilisation

La technique de phytovolatilisation s'applique à des éléments non dangereux une fois dilués, comme le sélénium qui est toxique à haute dose mais qui est ajouté comme oligoélément dans l'alimentation du bétail. Pour les éléments comme le sélénium ou le mercure qui deviennent volatils une fois méthylés, il est possible de transformer une plante et lui faire exprimer une méthylase, qui permettra la dispersion de la pollution par volatilisation.

Sur le site du laboratoire d'Argonne près de Chicago (ANL-East), ont été stockés de nombreux déchets nucléaires dont ceux provenant de la pile CP-1 construite par Enrico Fermi sous le stade de l'université de Chicago. Ce stockage a occasionné la pollution de la nappe phréatique par de l'eau tritiée. Des tubages ont été réalisés dirigeant les racines de peupliers en 1999, et 2 ans après, les peupliers poussent en volatilisant progressivement l'eau tritiée, tout en restant à des niveaux de concentration atmosphérique très en dessous des normes en vigueur.

7. L'avenir : une technologie mixte

Le laboratoire s'est positionné sur un programme national en soutien à Fukushima en collaboration avec d'autres laboratoires du CEA, l'IRSN, l'INRA, le CIRAD, Véolia, et Aréva. Ce programme DEMETERRES, financé par la France dans le cadre du Programme d'Investissement d'Avenir, a démarré en novembre 2013 pour une durée de 5 ans. Il s'agit d'optimiser

une méthode mixte de remédiation, réalisée après une cartographie très fine : traiter de façon physico-chimique les points très chauds, puis utiliser des techniques de phytoremédiation et de microbiologie, couplées à une valorisation de la biomasse, pour traiter les superficies plus importantes et moins contaminées.

8. Une algue verte, championne de la radiorésistance

Les chercheurs du CEA Grenoble et de l'Institut Laue Langevin ont eu la surprise de découvrir, dans une piscine d'entreposage de combustible irradié, un eucaryote survivant à des doses extrêmes de rayonnement (50 % de mortalité à 10 kGy), soit 2 000 fois supérieures à la dose létale pour l'homme. Cette algue verte unicellulaire a été identifiée comme étant du genre *Coccomyxa* et fut baptisée *actinabiotis* du fait de son biotope (Rivasseau *et al.*, 2013). Cette algue capte les métaux (par exemple : 110mAg avec un facteur de concentration de plus de 100 000), les lanthanides et les actinides, ainsi que le carbone-14.

C'est un organisme photosynthétique, auquel il n'est pas nécessaire de fournir de substrat carboné, et qui se développe simplement à partir de l'éclairage de la piscine. La comparaison avec l'utilisation de résines échangeuses d'ions montre l'efficacité des algues sur des périodes de l'ordre du mois : 40 g d'algues peuvent extraire 740 MBq d'une piscine de 360 m³ en trois semaines. Le développement est en cours avec le CEA pour en faire un procédé industriel.

Conclusion

Les défis à relever pour la bioremédiation sont les suivants :

- Les durées de traitement doivent être améliorées ;
- La contamination doit être modérée et non multiple ;
- Chaque cas est spécifique, avec de nombreux paramètres (climat, sol...) ;
- L'exploitation de la biomasse offre un potentiel intéressant ;
- Une meilleure coordination des recherches est souhaitée (création de bases de données) ;

- Il est nécessaire de développer des espaces de démonstration du potentiel de cette technologie.

Dans le cadre nucléaire : ces techniques sont peu attractives au niveau commercial en raison du caractère aléatoire de la demande ; elles requièrent donc un développement sur fonds publics. Il est vrai qu'en France, en l'état actuel de la législation et de l'état d'esprit de la société concernant la transgénèse, il est peu envisageable d'utiliser des plantes génétiquement modifiées pour dépolluer des sols. D'ores et déjà,

il est possible de faire des modifications génétiques, par des techniques non OGM, afin que certains gènes ne s'expriment plus, notamment ceux participant au transfert de Cs dans la plante. Toutefois, il est possible qu'à moyen terme, les opinions évoluent grâce à une meilleure information sur ce qu'est un OGM, en montrant que les plantes destinées à la phytoremédiation peuvent être conçues stériles et n'entrent pas dans la chaîne alimentaire.

1. vavasseur@cea.fr
2. PCB : polychlorobiphényles (pyralène)/polychlorinated biphenyls (pyralene).
3. TNT : trinitrotoluène/trinitrotoluene.
4. TCE : trichloréthylène/trichlorethylene.

Références

- Cologgi D.L., Lampa-Pastirk S. *et al.* (2011). Extracellular reduction of uranium via *Geobacter* conductive pili as a protective cellular mechanism. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, n° 108 (37), p. 15248-52.
- Fuhrmann M., Lasat M.M., Ebbs S.D. *et al.* (2002). Uptake of cesium-137 and strontium-90 from contaminated soil by three plant species; application to phytoremediation. *J. Environ. Qual.*, n° 31, p. 904-9.
- Lloyd J.R., Ridley J., Khizniak T. *et al.* (1999). Reduction of Technetium by *Desulfovibrio desulfuricans*: Biocatalyst Characterization and Use in a Flowthrough Bioreactor. *Appl. Environ. Microbiol.*, n° 65, p. 2691-96.
- McLean J., Beveridge T.J. (2001). Chromate Reduction by a *Pseudomonad* Isolated from a Site Contaminated with Chromated Copper Arsenate. *Appl. Environ. Microbiol.*, March, n° 67(3), p. 1076-84.
- Rivasseau C. *et al.* (2013). An extremely radioresistant green eukaryote for radionuclide bio-decontamination in the nuclear industry, *Energy Environ. Sci.*, n° 6, p. 1230-39 ; WIPO Patent Application WO/2011/098979.
- Timofeeva-Ressovskaia E.A. (1963). Isotope distribution in major components of fresh water systems. *Proc. Inst. Biol.*, n° 30, p. 3-72.

Froid, chauffage, santé

Cold, heat and health

Michel GAUTHIER¹

Résumé

Le froid constitue une agression à laquelle le corps humain doit faire face. Le confort moderne offre de nombreuses possibilités pour se défendre contre le froid, soit par des vêtements de mieux en mieux adaptés, soit en utilisant différents modes de chauffage qui sont de plus en plus performants mais ne sont pas sans générer des risques sanitaires. L'objectif de cet article consiste à détailler les risques induits pour pouvoir mieux les maîtriser.

Mots-clés

Modes de chauffage, confort thermique, systèmes de chauffage, risques sanitaires.

Se protéger du froid est un besoin vital comme boire, manger ou dormir ; la seule solution en extérieur, pas toujours accessible aux plus démunis, consiste à s'habiller chaudement grâce à des vêtements qui, aujourd'hui, peuvent être très efficaces.

Jusqu'au milieu du XX^e siècle, les habitations étaient peu chauffées. Le confort moderne a permis le développement de modes de chauffage qui ont généré de nouvelles nuisances. Lesquelles ? Et quelles sont les bonnes pratiques pour les éviter ? Pourtant, en France, certains, par manque de moyens, se chauffent insuffisamment et induisent ainsi des conséquences sanitaires néfastes.

Un premier rappel souligne les effets délétères du froid en tant que tel, en fonction de son intensité et de sa durée.

Un deuxième rappel, préalable à l'examen des problèmes rencontrés dans les locaux chauffés, porte sur la transmission de la chaleur, les sources de pertes thermiques et les inconforts ressentis dans les locaux.

Abstract

The cold constitute an assault against the human body. The modern comfort provides many opportunities to defend themselves against it, either with better and better appropriate clothing or by using different heating modes which are more and more efficient, even these imply health risks. The purpose of this article is to detail the risks induced in order to better avoid them.

Keywords

Heating modes, thermal comfort, heating system, health risks.

La troisième partie présente les différents modes de chauffage utilisés dans les locaux habités avec les risques directs ou indirects qu'ils induisent sur la santé, et les moyens de les éviter.

Cette présentation a pour objectif de montrer que :

- d'une part, l'évolution très récente des technologies contribue grandement à l'amélioration de l'efficacité des systèmes de chauffage et des conditions sanitaires des locaux ;
- d'autre part, il est possible d'agir individuellement pour pallier les inconvénients sanitaires des modes de chauffage.

1. Les effets délétères du froid

1.1 Agression modérée occasionnelle

Lorsque l'on est exposé au froid, la réaction normale de l'organisme est double : accroître la production de chaleur dans le corps (accélération

du métabolisme) et réduire les déperditions de chaleur corporelle.

1.1.1 Accélération du métabolisme

Le frisson, par la contraction des muscles, double la chaleur produite en consommant des sucres présents dans les muscles (glycogène), puis le foie reconstitue ces réserves. Lorsque les frissons ne suffisent pas à maintenir la température corporelle, des processus métaboliques plus complexes s'activent (thermogénèse métabolique). Tous ces processus consomment des réserves, entraînent une fatigue et affaiblissent les défenses naturelles. Ils ne portent pas à conséquence chez les adultes mais, chez les enfants, les personnes âgées et certains malades, ce stress peut s'avérer difficile à supporter et entraîner des complications graves avec, parfois, des accidents mortels.

1.1.2 Réduction des pertes thermiques

Pour maintenir la température corporelle, le corps utilise une seconde stratégie : la contraction des vaisseaux près de la peau. C'est la vasoconstriction. La température de la peau et des muqueuses descend en dessous de la température normale de 37 °C, ce qui réduit les pertes thermiques. Cependant, cette vasoconstriction engendre une fragilité de la peau puis progressivement des atteintes plus graves qui peuvent aller jusqu'à la nécrose.

Contrairement à une idée courante, se frictionner peut s'avérer très néfaste dans cette situation. Il est de même fortement déconseillé de s'exposer à une source de chaleur vive. Il convient, en priorité, de se protéger du vent ou des intempéries puis de se réchauffer avec une source à température modérée. Plus les engelures sont sévères, plus la chaleur utilisée devra être faible.

Pour les gelures graves, les soins doivent impérativement être prodigués en milieu hospitalier.

1.2 Les agressions modérées répétées

La répétition de ces épisodes entraîne une réduction des défenses de l'organisme. Des maladies opportunistes s'installent et des maladies habituelles par temps froid, comme la

grippe, peuvent prendre des formes plus sévères observées non seulement chez les SDF, mais aussi dans des familles démunies qui n'ont pas les moyens de chauffer décentement leur logement (précarité énergétique), d'autant que l'insuffisance de protection au froid s'accompagne souvent de malnutrition.

Dans un éditorial du *Bulletin épidémiologique hebdomadaire*², Martin Hirsch faisait remarquer que « l'espérance de vie des plus pauvres en France est plus proche de l'espérance de vie au Sierra Leone (34 ans), pays qui a l'une des espérances de vie les plus courtes au monde, que de l'espérance de vie de l'ensemble de la population française. Autrefois, la pauvreté tuait brutalement. Aujourd'hui, elle tue tout aussi sûrement, mais plus lentement ». Dans cette même publication, l'espérance de vie des SDF est estimée à 45 ans.

1.3 Hypothermie

La régulation thermique du corps s'effectue autour de 37 °C. Si, soumis au froid, ses pertes thermiques dépassent ses capacités, le corps se refroidit. Lorsque sa température descend au-dessous de 35 °C, il entre en hypothermie. Celle-ci engendre non seulement un stress métabolique important mais aussi un stress psychologique.

L'hypothermie est très dangereuse parce que ses symptômes apparaissent de façon si progressive que les victimes et leur entourage ne les remarquent souvent que tardivement. La gravité des conséquences est, bien entendu, largement influencée par l'état de santé de la personne en hypothermie.

Les conséquences sont d'autant plus sérieuses que l'hypothermie est importante. Jusqu'à 32 °C (hypothermie légère), une prise en charge rapide évite en général une issue fatale. Entre 28 °C et 32 °C (hypothermie sévère) les complications sont la règle avec une probabilité de séquelles persistantes, et le risque vital est engagé. Une prise en charge hospitalière est indispensable et urgente, (on réchauffe le patient par l'intérieur, grâce à la mise en place d'une circulation sanguine extracorporelle). En dessous de 28 °C (hypothermie profonde) les chances de survie sont réduites (arrêt du cœur, atteintes cérébrales ou mort par épuisement).

En France, aujourd'hui, ces pathologies sont devenues courantes chez les SDF, même en

l'absence de grands froids.

2. Pertes thermiques, rappels préliminaires

Le maintien d'une température modérée dans les locaux l'hiver procède d'un équilibre entre les déperditions de chaleur vers l'extérieur et les apports de chaleur dans le local. Cet équilibre dépend de la qualité de l'isolation thermique, de l'écart de température entre extérieur et intérieur, et de la quantité de chaleur apportée.

2.1 La transmission de la chaleur se fait suivant trois modes : radiation, conduction, et convection.

Le chauffage par radiation est familier : c'est la chaleur des rayons du soleil ou de celle d'un bon feu. Tous les corps émettent un rayonnement.



Figure 1

Un SDF de 59 ans, ex-légionnaire, mort de froid dans la rue à Paris (AFP 28/10/2012).

[A homeless man of 59 years, ex-legionnaire, died of cold in the street in Paris.](#)

Aux températures ambiantes, ce sont les infrarouges qui transportent cette chaleur, que ce soit un apport (rayonnement reçu) ou une déperdition de chaleur (rayonnement émis). C'est ainsi que les murs se refroidissent en émettant des rayons infrarouges vers l'extérieur.

La conduction est la propagation de la chaleur par la matière (solide, liquide et gazeuse). Elle joue un rôle très important dans les pertes thermiques des locaux car les matériaux de construction conduisent très bien la chaleur. Sans isolation, les murs se comportent comme des caloducs qui transportent vers l'extérieur la chaleur prise à l'air intérieur ambiant.

Si l'air ne nous isole pas, c'est qu'intervient la convection : l'air se refroidit au contact des murs et des fenêtres, et descend vers le sol, ce qui assure un brassage et un refroidissement progressif de tout l'air intérieur.

L'exemple des vitrages permet de détailler ce mécanisme : dans le cas d'un vitrage simple (c'est-à-dire sans espace d'air ou de gaz), la transmission de chaleur entre les deux faces du verre se fait uniquement par conduction. Le taux de déperdition de chaleur est particulièrement important car le verre est très bon conducteur de la chaleur. Un double-vitrage simple réduit très nettement ces pertes, sans que l'épaisseur d'air joue un rôle déterminant, car l'air du double-vitrage isole de la conduction, mais pas de la radiation. La paroi du verre intérieur émet des infrarouges vers l'extérieur à travers l'air du double-vitrage. Depuis une vingtaine d'années, des doubles-vitrages à haute performance (basse émissivité) sont recouverts par une couche réfléchissant les infrarouges. Les pertes par rayonnement sont ainsi fortement réduites. Une amélioration complémentaire peut être obtenue en remplaçant l'air par de l'argon ou du krypton.

Épaisseur de gaz	Doubles-vitrages simples 4-x-4			Doubles-vitrages à basse émissivité 4-x-4			Triple-vitrage
	Air	Argon	Krypton	Air	Argon	Krypton	
6 mm	3,3	3,0	2,7	2,5	2,0	1,4	2,3
9 mm	3,0	2,8	2,6	2,0	1,6	1,0	2,0
12 mm	2,9	2,7	2,6	1,7	1,3	1,0	1,9
15 mm	2,7	2,6	2,5	1,5	1,1	1,0	1,8
20 mm	2,8	2,6	2,6	1,4	1,2	1,1	1,7

Tableau 1

Coefficient de transmission thermique ($W/m^2/K$) de différents doubles-vitrages isolants.

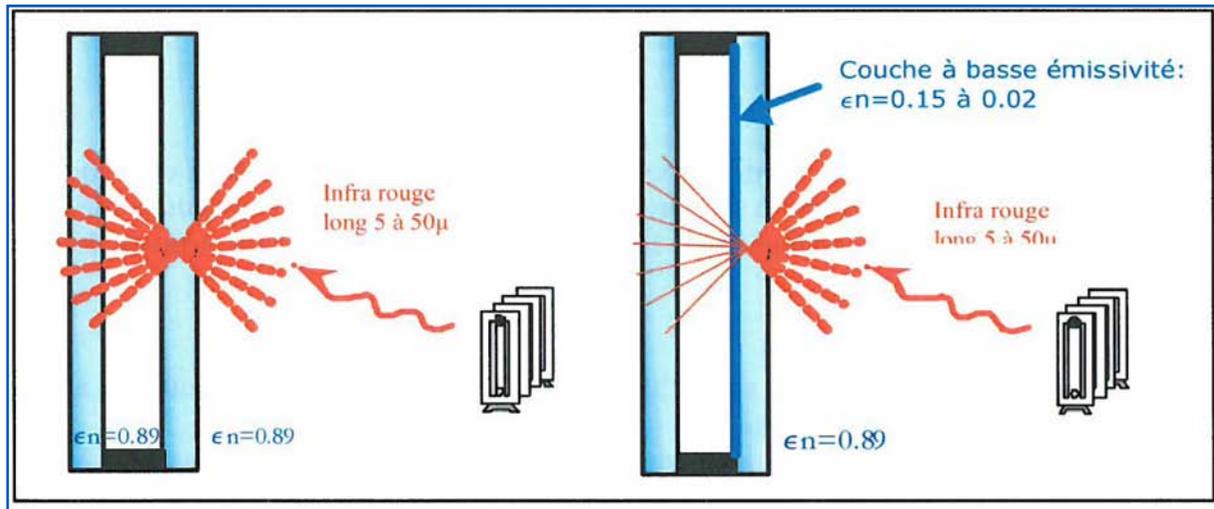


Figure 2

Double-vitrage et double-vitrage à basse émissivité (source : Hirsch, 2007, p. 8).
 Double-glazing and low emissivity double-glazing.

Le tableau 1 donne le coefficient de transmission thermique pour différents types de vitrages.

Remarques :

Les vitrages à hautes performances sont encore peu utilisés en France bien que leur surcoût soit amorti en deux à trois ans.

Ce tableau montre le peu d'intérêt des triples-vitrages par rapport aux vitrages à basse émissivité.

Les vitres, qui sont souvent les parois les plus froides d'un logement, sont source d'inconfort, même quand la température du local est suffisante. En effet, notre corps est sensible aux infrarouges émis par les murs et parois. Un déficit d'émission est perçu comme une source de froid !

Pour conclure, la rénovation de l'isolation des locaux s'impose de plus en plus car :

- pour l'utilisateur final, le coût des énergies augmente rapidement tandis que les techniques d'isolation font de grands progrès. Mieux isoler devient rapidement rentable.
- pour l'État, une partie de l'énergie est importée et pèse dans la balance commerciale donc sur la dette du pays. Réduire la consommation d'énergie pour le chauffage des locaux est un impératif économique et politique pour respecter les engagements internationaux de la France.
- pour les générations futures, le gaspillage énergétique conduit à un épuisement des ressources fossiles et à des dérèglements climatiques sur une période pluriséculaire.

3. Les principaux systèmes de chauffage et leurs risques sanitaires

Les systèmes de chauffage génèrent trois types de risques distincts :

- un risque intrinsèque : indépendamment de la source de chaleur, le fait de chauffer un local assèche l'air, ce qui provoque des dangers pour la santé.
- le confinement de l'air dans les locaux, souvent pratiqué par temps froid, a des conséquences délétères importantes.
- les sources primaires de chaleur sont à l'origine de nombreux problèmes sanitaires et dépendent très largement du système utilisé : chauffage individuel ou collectif, nature de la source (bois, charbon, fuel, gaz, nucléaire), moyens utilisés pour minimiser les rejets polluants.

3.1 Air trop sec

Tout système de chauffage assèche l'air, et plus la température de chauffage est élevée, plus le taux d'humidité est déficitaire. Un taux d'humidité inférieur à 40 % est néfaste pour la santé. C'est le taux d'humidité obtenu lorsqu'on chauffe à 20 °C un air extérieur humide ayant une température de 7 °C !

Plus la température extérieure est basse, plus le taux d'humidité absolue diminue. En hiver, sans précaution particulière, l'hygrométrie des locaux est, le plus souvent, nettement inférieure à ce seuil de 40 %. Contrairement à une idée

répandue, aérer les locaux, pratique bénéfique par ailleurs, n'a aucun effet positif sur la sécheresse de l'air, au contraire. Or les normes de VMC de base sont très élevées au regard du maintien d'une hygrométrie de bonne qualité, c'est-à-dire comprise entre 40 et 50 %.

En quoi la sécheresse de l'air est-elle néfaste ?

La conséquence la plus directe d'une humidité insuffisante est l'assèchement des muqueuses et de la peau.

Effets directs : les muqueuses sèches sont non seulement inconfortables, mais elles deviennent surtout plus sensibles à une cohorte de maladies de toute nature : rhumes, rhinites, bronchites, angines, conjonctivites, etc. La peau est plus sensible aux gerçures, des eczémas sont possibles.

Effets indirects : la sécheresse entraîne également un accroissement du taux de poussière dans l'air, source de pathologies.

Quelles sont les précautions à prendre ?

La première précaution est de s'humidifier soi-même, c'est-à-dire de boire en quantité suffisante car, lorsque l'air est sec, respirer déshydrate et, corrélativement, chaque respiration humidifie l'air. Dans un logement avec une ventilation de bonne qualité³, cet apport est significatif⁴.

La seconde précaution consiste à limiter la température, en particulier la nuit dans les chambres. Il n'est pas utile de chauffer une chambre à plus de 17° à condition d'utiliser une bonne couette, ce qui ne dispense pas d'aérer quotidiennement au moins un quart d'heure pour compenser l'oxygène consommé pendant la nuit.

La solution la plus simple pour atteindre le seuil d'humidité de 40 % est d'installer des humidificateurs. Encore faut-il que la maison soit assez uniformément isolée sinon la vapeur d'eau se condense sur les zones froides, et des moisissures se développent aux points de condensa-

tion, elles aggravent les pathologies respiratoires.

D'autre part, tous les types d'humidificateurs ne se valent pas d'un point de vue sanitaire. Il existe trois types d'évaporateurs : à vapeur froide, l'eau est absorbée par un papier buvard et s'évapore naturellement ; à ultra-sons, l'eau est vaporisée en fine gouttelettes ; et à vapeur chaude, l'évaporation de l'eau est forcée par un chauffage.

Les évaporateurs à vapeur froide sont les plus recommandables, car les évaporateurs à ultra-sons émettent des poussières fines de calcaire, et les évaporateurs à vapeur chaude, outre leur consommation électrique significative, peuvent facilement provoquer un taux d'humidité trop élevé. En tout état de cause, les humidificateurs doivent être nettoyés régulièrement, car l'eau stagnante est un excellent réservoir à bactéries⁵ !

Un taux d'humidité supérieur à 50 % favorise le développement des acariens, source très fréquente de problèmes respiratoires. Se doter d'un hygromètre fiable est le premier investissement à recommander !

Lorsque le chauffage est fourni par des radiateurs classiques, les bons vieux évaporateurs sont une solution efficace et économique. Cependant, ce récipient chaud favorise le développement bactérien.

Dans les habitats de haute qualité environnementale, la solution réside dans des systèmes de ventilation double flux « hydro-réglables ». L'air intérieur qui est extrait sert à réchauffer l'air frais en provenance de l'extérieur, et le taux d'humidification de l'air renouvelé est ajusté. L'humidité de l'air est optimale et les factures de chauffage minimales.

Certaines variétés de plantes⁶ d'appartement constituent d'excellentes solutions à ce problème, avec l'inconvénient qu'une plante demande un minimum d'entretien voire même des pulvérisations de biocides !

Températures	-5 °C	0 °C	14 °C	20 °C	23 °C
Taux d'humidité	100 %	69 %	26 %	18 %	15 %

Tableau 2

Taux d'humidité obtenu lorsque l'on chauffe un air extérieur humide par temps de gel (-5 °C).

3.2 Air vicié

Nous passons 70 à 90 % de notre temps dans des locaux confinés, qu'il s'agisse d'espaces privés (logements individuels ou collectifs), de bâtiments professionnels (bureaux et commerces) ou de lieux accueillant du public (transports, administrations, écoles, hôpitaux, salles de sport et de cinéma, etc.). Or ce n'est que très récemment que la qualité de l'air dans les locaux a été étudiée⁷. Les études ont mis en évidence des niveaux de pollution non négligeables liés à des sources de polluants provenant des locaux eux-mêmes plus que de l'air extérieur.

Il est tentant, pour réduire les factures de chauffage, d'obstruer les prises d'air réglementaires et de bloquer ainsi le renouvellement d'air. Cette pratique est particulièrement néfaste, car elle conduit à accroître la concentration de produits malsains dans l'atmosphère inhalée. Les problèmes de santé dus à ces pollutions sont multiples et recouvrent des manifestations cliniques très diverses, qui, pour la plupart, ne sont pas spécifiques des polluants détectés. La mise en évidence des relations de cause à effet est de ce fait particulièrement difficile.

Ce qui est par contre certain, c'est un développement très inquiétant de certaines pathologies⁸ dues à l'ensemble de ces produits présents dans l'air des locaux.

« L'ensemble des maladies allergiques (asthme, rhinite, conjonctivite, allergie alimentaire, etc.) concerne 25 à 30 % de la population dans les pays industrialisés. Leur prévalence a considérablement augmenté au cours des 20-30 dernières années (INSERM). En France, 13 % des enfants de 11 à 14 ans ont déjà eu de l'asthme dans leur vie. Le coût du traitement de l'asthme pour l'Assurance maladie est estimé entre 200 et 800 M€ par an (ANSES, 2007). Le tabagisme passif augmente le risque de cancer du poumon des non-fumeurs de 20 à 30 %. Le monoxyde de carbone est responsable annuellement d'une centaine de décès et d'environ 1 300 épisodes d'intoxication, impliquant environ 4 000 personnes exposées (Verrier et al., 2010).

En ce qui concerne la légionellose, depuis 2005, une diminution régulière du taux d'incidence s'était amorcée en France. En 2010, avec 1 540 cas, on assiste à une augmentation de 28 % du nombre de cas par rapport à 2009, soit un taux d'incidence en France métropolitaine de 2,4

pour 100 000 habitants (Campese et al., 2011). Le coût des effets d'une mauvaise qualité de l'air intérieur en France, calculés selon les indicateurs globaux de détrimement sanitaire utilisés par l'OMS, sont aujourd'hui estimés entre 12,8 et 38,4 milliards d'euros par an (Jantunen et al., 2011). »

3.3 Pollution des locaux par les systèmes de chauffage

Hormis le chauffage électrique et les maisons passives (cas marginal), la source de chaleur provient d'une combustion plus ou moins locale. Toutes les sources d'énergie présentent des dangers. Quels sont-ils ? Certains peuvent être évités, d'autres sont plus ou moins bien maîtrisés.

Les impacts sur la santé des systèmes de chauffage dépendent de plusieurs facteurs :

- la nature de la source de chaleur ;
- les caractéristiques de l'unité de chauffe ;
- la taille et la localisation de l'unité de chauffe ;
- le respect des consignes d'utilisation.

3.3.1 Chauffage par radiateurs électriques

C'est un cas particulier de production énergétique centralisée. De ce fait, l'impact sur la santé n'est pas directement perceptible dans les locaux habités.

Ce type de chauffage a l'avantage, pour l'utilisateur, de ne pas nécessiter de stockage de combustible puisque la production d'électricité est externe, le plus souvent, dans de grandes unités.

L'analyse des avantages et des inconvénients de ces centrales, en termes d'émissions de pollution et d'impact sur le climat, sort du cadre de cet article. Un cas particulier mérite cependant d'être cité, celui des centrales au charbon car, d'une part, elles sont en forte augmentation depuis peu, d'autre part, elles constituent sans conteste le cas le plus dangereux. Une analyse précise en est faite dans un récent article de Jean-Marc Jancovici : « Est-ce dangereux d'utiliser le charbon »⁹.

Globalement, le chauffage par radiateurs électriques et la production électrique par combustion d'énergie fossile ne se justifient pas d'un point de vue économique ou ne sont pas économiquement justifiés : le rendement global du chauffage est inférieur d'au moins 50 % à celui d'une combustion locale !

Quant aux énergies alternatives, éoliennes et solaires photovoltaïques, encore peu développées, elles posent de redoutables problèmes de coût et d'utilisation, inhérentes à leurs caractéristiques de production intermittentes¹⁰. L'exemple allemand est d'actualité et en plein débat dans ce pays.

En revanche, le chauffage par pompe à chaleur présente un rendement global satisfaisant.

3.3.2 Chauffage par pompes à chaleur

La pompe à chaleur chauffe en utilisant une source externe à température inférieure à celle du local chauffé. Le coefficient de performance (rapport entre l'énergie utilisée et la quantité de chaleur produite), est largement supérieur à un, mais dépend principalement de trois facteurs : l'écart de température entre la source externe et le local chauffé, la variabilité de la température de la source externe, la technologie utilisée.

Le système « air-air » est la solution la plus simple et nécessite l'investissement le plus faible. Les calories sont puisées dans l'air extérieur ambiant et restituées par soufflage d'air chaud dans le local. Pourtant, ce système présente deux inconvénients : le coefficient de performance décroît lorsqu'il fait froid à l'extérieur, tandis que le rendement d'un appareil qui doit s'adapter à une gamme étendue de températures extérieures est largement inférieur à celui des appareils qui utilisent une source à température constante.

Les systèmes « air-eau » : les calories sont également puisées dans l'air extérieur ambiant et restituées par des radiateurs classiques, avec les mêmes inconvénients que dans la solution précédente.

Les systèmes « eau-eau » : la chaleur est restituée par des radiateurs, mais les calories proviennent d'un milieu humide (rivière, étang, nappe phréatique) dont la température ne varie pratiquement pas. Le coefficient de performance est élevé et stable. Malheureusement, en zone urbaine, la disponibilité de cette « source externe » est le plus souvent largement inférieure aux besoins.

3.3.3 Géothermie

Bien qu'encore très peu utilisée, la géothermie est *a priori* une solution séduisante : elle consiste

à se chauffer en utilisant la chaleur qui règne naturellement dans la terre ; le plus souvent couplée à une pompe à chaleur, elle n'induit aucune nuisance particulière pour la santé.

Il existe trois sortes principales de chauffage par géothermie :

- la géothermie de surface : de l'eau circule dans des tuyaux enfouis à faible profondeur, environ un mètre. L'eau prend la température du sol, dans nos régions environ 16 °C, et une pompe à chaleur permet de se chauffer avec un coefficient de performance (COP) excellent, stable et élevé. Malheureusement, cette solution n'est praticable que pour des maisons individuelles, car la surface occupée par les tubes est de l'ordre du double de la surface à chauffer. De plus, le sol ne conduit correctement la chaleur que s'il est humide. Dans nos régions, le fonctionnement en climatisation est de ce fait aléatoire. Enfin, en cas de fuite dans le circuit enterré, les travaux de réparation sont coûteux et pénalisants pour la qualité du jardin !
- la géothermie verticale : une paire de tubes est enfoncée verticalement dans le sol à une profondeur de cent à deux cents mètres. Le fonctionnement du chauffage est similaire au cas précédent. Cette solution est bien adaptée aux sols de type granitique ou aux sols avec des

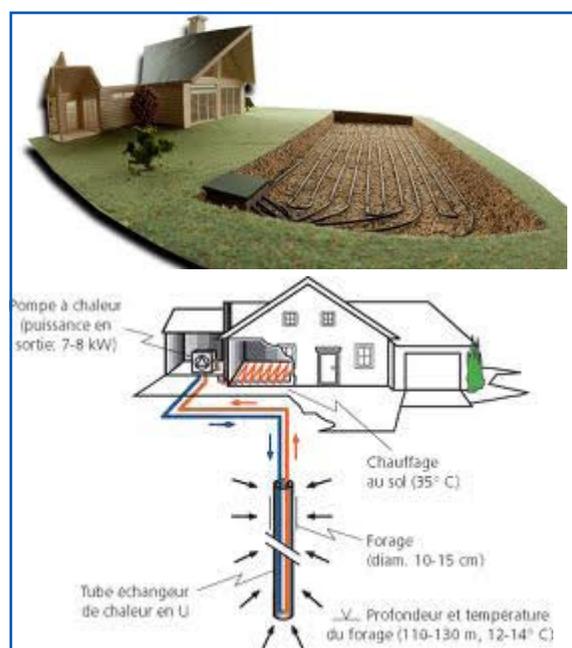


Figure 3

Géothermie de surface et géothermie verticale (source : Aixclim.fr référence 3 et référence 4 D, Vuataz, 2002).

[Geothermal energy near the surface and geothermal energy at medium depths.](#)

nappes phréatiques épaisses. L'exemple de Grenoble démontre que, comme dans le cas précédent, la solution est peu praticable en agglomération, car la ressource thermique du sol est très inférieure aux besoins de tous les bâtiments présents sur le territoire.

- la géothermie par source chaude : dans certains cas, globalement assez peu fréquents, on peut directement extraire du sol de l'eau chaude. Les problèmes rencontrés sont spécifiques à chaque site. En France, le bassin parisien, l'Alsace et la région aquitaine disposent de telles ressources en quantité significative.

3.3.4 Chauffage par appareils individuels

C'est ce type qui présente les plus grands risques, car les petits appareils sont moins performants que les chaudières de forte puissance des chauffages collectifs.

Toute combustion consomme de l'oxygène et rejette du gaz carbonique. Le besoin de renouvellement d'air est de ce fait important. Si cet apport est insuffisant, la qualité de l'air s'en ressent, mais aussi les risques d'émanation de CO, gaz inodore sans saveur et très toxique, sont élevés.

De plus, l'importance du renouvellement d'air entraîne une exigence d'humidification plus élevée et plus difficile à réguler.

3.3.4.1 Chauffage au bois

Le chauffage au bois, le plus ancien, est le moins onéreux, mais cumule les risques. Les chaudières modernes ont un bon rendement calorifique, de 55 à 70 %, suivant le type de chaudière¹¹. Une combustion défectueuse (effectuée à une température insuffisamment élevée) produit des résidus gazeux toxiques¹² et des cendres en volume important. Celles-ci, constituées par des particules fines, sont néfastes pour les voies respiratoires.

L'entretien annuel est impératif¹³. Les feux de cheminée peuvent avoir des conséquences catastrophiques.

Enfin, l'investissement initial est plus élevé qu'avec les autres solutions de chauffage individuel, et le stockage du bois requiert des volumes beaucoup plus importants que pour les énergies fossiles.

3.3.4.2 Chauffage au fioul

C'est une solution très répandue car l'alimentation de la chaudière et la régulation de la puissance de chauffe sont automatiques. Le fioul, dont l'achat contribue au déficit de la balance commerciale, émet des polluants toxiques, des gaz à effet de serre et encrasse les cheminées.

3.3.4.3 Chauffage au gaz par chaudières

Le gaz, peu disponible sur le sol français, offre une meilleure solution puisque le rendement des chaudières modernes est excellent. Lorsque la chaudière est bien entretenue, les rejets dans l'atmosphère sont nettement inférieurs à ceux des chaudières à fioul. Cependant, toute fuite de gaz peut conduire à des explosions dévastatrices.

3.3.4.4 Chauffage au charbon

En tant que chauffage individuel, ce type de chauffage en France, autrefois très développé, est tombé en désuétude en raison de la toxicité des fumées émises et des sujétions d'exploitation.

3.3.4.5 Chauffage par poêle à pétrole

Les poêles à pétrole sont des chauffages mobiles sans canalisation d'évacuation des fumées. Bien qu'autorisés à la vente mais particulièrement dangereux, ils sont souvent utilisés comme chauffage d'appoint pour des raisons financières. Ils sont la cause d'intoxications souvent mortelles (monoxyde de carbone), et peuvent provoquer des incendies.

3.3.5 Les chauffages collectifs

Dans un chauffage collectif, une ou plusieurs chaudières desservent un ensemble de locaux. Il s'agit, le plus souvent, d'immeubles de logements mais aussi de bureaux, d'écoles, d'hôpitaux, etc. La chaleur est le plus souvent distribuée par des radiateurs. Les seuls inconvénients directs dans les locaux habités sont liés à la sécheresse de l'air parfois également vicié en raison d'un confinement inapproprié.

Les chaufferies en elles-mêmes restent sources de problèmes de santé, mais par le biais de la pollution de l'air extérieur.

D'une façon générale, les chaufferies collectives sont d'autant plus efficaces, tant sur le plan énergétique que sur le plan environnemental,

qu'elles sont de facture plus récente et de plus grande puissance. Les chaudières de grande puissance utilisent des réseaux de chaleur et ne sont donc possibles qu'avec un urbanisme adapté. Malheureusement, la France est dans ce domaine très en retard par rapport à des pays comme l'Allemagne.

Les réseaux de chaleur présentent de nombreux avantages : leur rendement énergétique est excellent, leur taille leur permet de disposer d'un personnel de maintenance compétent et de rentabiliser des dispositifs d'épuration des fumées, autant d'atouts qui ne sont pas accessibles aux petites installations. Les combustibles utilisés sont variés, ce qui permet d'optimiser les coûts, tandis que les infrastructures sont évolutives.

1. Conclusions

Grace au progrès technique, le confort des lieux de vie a beaucoup progressé depuis le milieu du XX^e siècle, mais il a généré des risques sanitaires notables. L'examen de ces problèmes montre qu'une grande partie de ces risques peut être maîtrisée non sans une certaine vigilance. La question du chauffage se pose également au niveau collectif et doit répondre aux enjeux de la crise climatique et énergétique. Les moyens à mettre en œuvre pour améliorer la performance des systèmes de chauffage sont multiples, ils concernent à la fois les bâtiments et les équipements, ils reposent sur une ingénierie financière et technique qu'il faut faire progresser pour sortir de l'impasse énergétique actuelle.

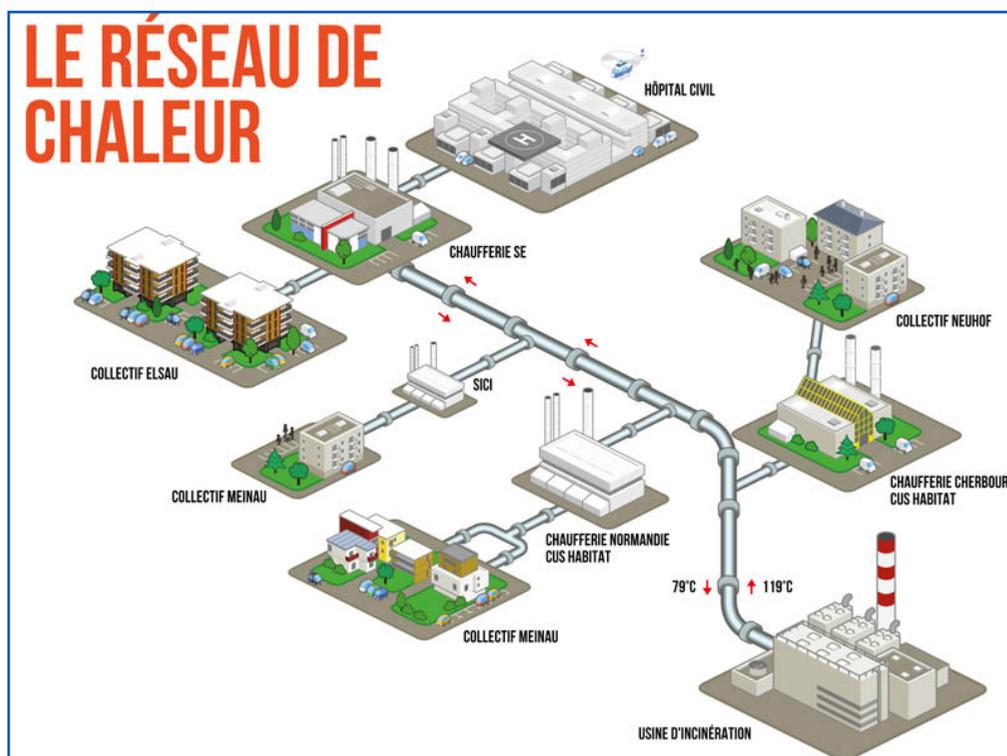


Figure 4

Réseau de chaleur de la Sénerval à Strasbourg (source : <http://www.senerval.eu>).
The Senerval's heating system.

1. Michel-francois.gauthier@m4x.org
2. Les inégalités sociales de santé en France en 2006 : éléments de l'état des lieux, *BEH* du 23 janvier 2007, Institut de Veille Sanitaire.
3. Les normes de ventilation varient de façon importante en fonction de la qualité du système de ventilation.
4. La respiration d'une personne constitue un apport d'environ deux litres d'eau par jour.
5. Une étude récente fait le point des avantages et inconvénients des humidificateurs : <http://www.rts.ch/emissions/abe/1367262-humidifiez-moi-le-blues-des-humidificateurs.html>

6. On peut citer, par exemple, la fougère de Boston et le Pothos.
7. Les premiers résultats officiels ont été publiés en France par l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur en novembre 2006.
8. Deux dossiers assez complets sont disponibles (<http://www.oqai.fr/ObsAirInt.aspx>) http://www.ors-idf.org/dmdocuments/rapport_pollairint.pdf. Le texte cité ci-dessous est extrait d'un document de l'Observatoire de l'Air Intérieur : <http://www.oqai.fr/ObsAirInt.aspx?idarchitecture=182> *expositions et effets sanitaires*.
9. Cf. http://www.manicore.com/documentation/petrole/danger_charbon.html méfaits du charbon
10. Cf. <http://www.contrepoints.org/2012/09/09/96674-allemande-de-nouvelles-centrales-a-charbon-pour-compenser-les-echecs-eolien-et-solaire>
11. Cf. ADEME http://www.costic.com/fileadmin/user_upload/6-Telechargements/Chaudieres_a_buches.pdf
12. HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques.
13. Un entretien régulier est en premier lieu un impératif de sécurité, mais il améliore le rendement des poêles et réduit la pollution générée par la combustion. C'est au final une opération rentable !

Références

- Académie de Nice. (2012). *Dossier sur la qualité de l'air*, 4 janvier. [En ligne]. www.ac-nice.fr/tocqueville/pdf/riodocumentation.pdf
- AFSSET. (2007). Étude d'impacts sur les coûts que représentent pour l'Assurance maladie certaines pathologies liées à la pollution. Illustration avec l'asthme et le cancer. [En ligne]. Rapport d'analyse, octobre, www.anse.fr
- Campèse C. et al. (2010). La légionellose en France : augmentation du nombre de cas en 2010. [En ligne]. http://opac.invs.sante.fr/doc_num.php?explnum_id=7177
- Glaverbel (AGC Class Europe). (2004). Verre et isolation thermique. Note technique, [en ligne], www.idverre.net/veille/dostec/isolation-thermique/isolation-thermique.pdf
- Hirsch M. (2007). La réduction des inégalités de santé est au cœur de la cohésion sociale. *Bulletin épidémiologique mondial*, n° 2-3, 23 janvier.
- Humidifiez-moi ! Le blues des humidificateurs RTS.ch., [en ligne], émission du 10 février 2009, www.rts.ch/emissions/abe/1367262-humidifiez-moi-le-blues-des-humidificateurs.html
- Inserm. *Dossier d'information « Allergies »*. [En ligne]. <http://www.inserm.fr/thematiques/immunologie-hematologie-pneumologie/dossiers-d-information/allergies>
- Jancovici JM. Méfaits du charbon. [En ligne]. http://www.manicore.com/documentation/petrole/danger_charbon.html
- Jantunen et al. (2011). Promoting actions for healthy indoor air (IAIAQ). European Commission. Directorate General for Health and Consumers. Luxembourg.
- Kemm K. (2012). De nouvelles centrales à charbon pour compenser les échecs éoliens et solaire. [En ligne]. Environnement, matières premières et énergie, 9 septembre 2012. <http://www.contrepoints.org/2012/09/09/96674-allemande-de-nouvelles-centrales-a-charbon-pour-compenser-les-echecs-eolien-et-solaire>
- Observatoire de la qualité de l'air. [En ligne]. <http://www.oqai.fr/ObsAirInt.aspx?idarchitecture=182>
- Réseau de chaleur & agir pour l'environnement. <http://www.senerval.eu/senerval>
- Verrier A. et al. (2010). Les intoxications au monoxyde de carbone survenues en France métropolitaine en 2007. *BEH* du 12 janvier, n° 1.
- Vuataz FD. (2002). La chaleur de la Terre, une énergie propre et durable pour tous. [En ligne]. www.ader.ch/energieaufutur/energies/geothermie/

Pollution atmosphérique, sources urbaines et santé : un lien documenté de manière de plus en plus précise

Atmospheric pollution, urban sources and health: a link documented in a more and more precise way

Denis ZMIROU

Directeur adjoint du centre INSERM 1085 de Rennes sur la relation santé-environnement

Résumé

Les connaissances sur la relation entre la santé et la pollution atmosphérique se sont beaucoup affinées, surtout depuis le développement des nouvelles études épidémiologiques et toxicologiques mises en oeuvre depuis les années 1990. Si la pollution intérieure représente le risque majeur dans les pays en voie de développement, dans les pays dits « avancés », les effets néfastes de la pollution automobile urbaine sont de mieux en mieux connus, aussi bien sur le court terme que sur le long terme. Ainsi, les particules issues majoritairement de la motorisation diesel ont une incidence sur la maladie asthmatique mais aussi sur les maladies cardio-vasculaires et même sur le développement cognitif de l'enfant. En revanche, les efforts effectués pour mieux maîtriser la pollution urbaine se traduisent par un gain d'espérance de vie.

Mots clés

Pollution atmosphérique urbaine, pollution particulaire, risque sanitaire lié à la pollution atmosphérique.

La mise en évidence de la relation entre la pollution de l'air et la santé a toute une histoire qui se précise et s'amplifie lors de la révolution industrielle. Les indicateurs pour rendre compte de cette évolution ont changé. Depuis les accidents de Londres survenus dans les années cinquante, les effets délétères de la combustion du charbon sont connus ; mais, actuellement, ce sont les émissions des voitures et la pollution urbaine qui sont les plus inquiétantes et font l'objet

Abstract

The knowledge on the relation between the health and the atmospheric pollution became refined a lot, especially since the development of the new epidemiological and toxicological studies since the 1990s. If indoor air pollution use to be the main risk in developing countries, in « developed » countries, the sanitary effects of the urban automobile pollution are known better and better as well on the short term as on the long term. So, the particles emissions coming from the diesel motorization, have an incidence on the asthmatic disease but also on the cardiovascular diseases and even on the cognitive development of the child. On the other hand, the efforts made to reduce the urban pollution are rewarded by a gain of life expectancy.

Keywords

Urban air pollution, particulate matter pollution, air pollution sanitary risk.

d'investigations de plus en plus précises.

C'est le célèbre accident de Londres en 1952 qui marque le début de l'intervention des pouvoirs publics contre la pollution urbaine pour préserver la santé des populations en prenant des décisions drastiques. Au cours de l'hiver 1952, le mélange de poussières issues de la combustion du charbon et de dioxyde de soufre SO₂ avec les brouillards particulièrement fréquents à Londres,

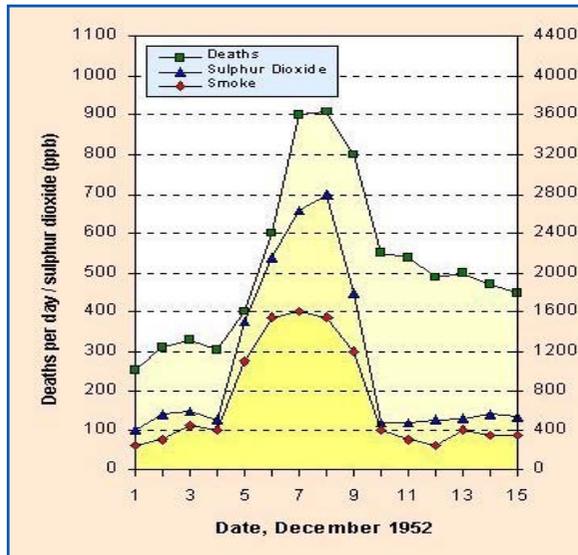


Figure 1

Nombre de morts au début du mois de décembre de 1952
(source : Bell ML, Davis DL., 2001).

Number of deaths at the beginning of December of 1952.

produit le célèbre « smog » responsable d'un surcroît de mortalité au cours de ce même hiver (figure 1).

Cet épais brouillard de poussières, associé à des éléments acides liés à la combustion du charbon et l'oxydation du soufre présent dans le pétrole et le charbon, est considéré comme responsable des 15 000 morts (figure 1). En effet, les indicateurs utilisés à l'époque pour mesurer la pollution atmosphérique, fumées noires et SO_2 , sont très élevés (figure 1). Le soufre s'oxyde avec l' O_2 présent dans l'air et, grâce à la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère, il se transforme en H_2SO_4 , acide très puissant. Cette relation entre la recrudescence des décès et l'acidité de l'air est indiscutablement causale. Aujourd'hui, cette situation ne se retrouve plus dans les pays les plus avancés mais elle est dorénavant massive dans les pays émergents, comme le montre l'épisode de pollution produit à Pékin en janvier 2013 avec des niveaux de particules qui ont atteint 900 mg/m^3 , soit des niveaux supérieurs à ceux qui ont été atteints lors de l'épisode londonien (Le Monde, 2013¹).

L'impact de la pollution de l'air à l'échelle mondiale le plus important pour la santé est dû à l'air intérieur dont la qualité est très dégradée en raison de l'utilisation de sources de combustion liées à la biomasse, au lignite et au mauvais charbon (figure 2).



Figure 2.

Pollution de l'air intérieur à Madagascar.

Indoor air pollution in Madagascar.

La situation que l'on trouve le plus souvent aujourd'hui dans les pays dits « avancés » est celle de Los Angeles, mégaconurbation avec un petit centre mais d'énormes périphéries, manifestation de l'étalement urbain dans lequel la voiture s'impose pour se déplacer, provoquant ainsi une pollution photo-oxydante observée à travers ce nuage jaunâtre, bien connu ; il se développe surtout lorsque les températures sont élevées.

Que ce soit à travers l'air intérieur ou extérieur, l'impact de la pollution atmosphérique sur la santé a fait l'objet d'une recherche très nourrie dans le monde entier. Cependant, à la fin des années 1970, la question de la pollution atmosphérique était considérée comme réglée, et peu d'études étaient entreprises sur le sujet ; mais la reprise est très nette depuis les années 1990 en raison de nouveaux développements méthodologiques, notamment en épidémiologie (figure 3).

Quels sont les résultats issus des études récentes ? Ils s'appuient sur un corpus de connaissances qui n'est pas lié uniquement à l'épidémiologie mais aussi sur des centaines d'études qui relèvent de la toxicologie expérimentale, avec des études portant sur du matériel cellulaire ou sur des animaux. Elles relèvent surtout de trois domaines dans lesquels se sont développés de nombreux travaux sur les effets de la pollution de l'air : les cancers, l'asthme et les maladies cardio-vasculaires. Tous les résultats convergent vers la mise en évidence d'effets de plus en plus larges de la pollution de l'air sur la santé.

Lors du colloque récent de la conférence annuelle des sociétés savantes sur les sciences de l'exposition et de l'épidémiologie, qui s'est

tenu à Bâle (ISEE, ISEA et ISIAQ), les deux tiers des communications portaient sur la pollution de l'air pour 1 700 participants, ce qui montre l'importance des préoccupations sur le sujet.

Une synthèse publiée par l'European Respiratory Society² en 2010 porte à la fois sur les effets aigus et chroniques. Cette étude s'appuie sur des centaines de recherches qui utilisent des données très solides sur les impacts de la pollution et sur l'évolution au jour le jour des risques d'infarctus du myocarde et d'un certain nombre de maladies respiratoires.

Les effets à long terme sont particulièrement préoccupants et commencent à être renseignés. La pollution contribue à obstruer les vaisseaux cardiaques et même périphériques, avec pour conséquence le déclenchement d'infarctus ; elle contribue à l'occurrence des cancers et à la dégradation de la fonction respiratoire. Elle est responsable non seulement de l'incidence de l'asthme au cours de pointes de pollution, mais elle contribue à l'aggravation de la maladie asthmatique. En fait, elle est sûrement responsable de l'augmentation de la prévalence (fréquence) de la maladie asthmatique et vraisemblablement de son incidence (nouveaux cas). Des hypothèses moins étayées s'appuient sur des travaux plus récents suggérant l'impact de la pollution sur le développement cognitif des enfants, voire même l'autisme.

Une autre synthèse dans la revue de référence *Circulation*³, en 2010, met l'accent sur les effets démontrés par des travaux expérimentaux sur les processus inflammatoires respiratoires, montrant les mécanismes de l'atteinte cardio-vasculaire. En 1989-90, les toxicologues étaient sceptiques sur les conséquences de la pollution sur les maladies cardio-vasculaires ; les seules données solides étaient, selon eux, issues de l'épidémiologie. Ce n'est plus le cas. La production, dans le foie, d'agents qui augmentent la coagulation du sang (par des voies nerveuses qui influencent le système parasympathique) ont été mises en évidence. Les mécanismes sont actuellement connus, même si de nombreuses recherches peuvent encore être conduites.

Un article publié en 2009 dans le *New England Journal of Medicine*⁴ identifie, pour une cinquantaine de villes américaines, une association entre la pollution particulaire et l'espérance de vie. Mais « association is not causation ». Cette simple comparaison n'est pas très convaincante, car les populations se différencient par bien d'autres facteurs que la qualité de l'air. Les auteurs se sont alors intéressés au lien entre l'évolution dans une ville donnée de la pollution atmosphérique et de l'espérance de vie. Or les villes dans lesquelles la maîtrise de la pollution a été la plus forte sont celles qui ont connu le gain d'espérance de vie est le plus élevé. C'est-à-dire un gain d'espérance de vie de un an pour une diminution de 15 mg/m³ sur les PM_{2,5}, soit de l'ordre de 1/5^e du gain en

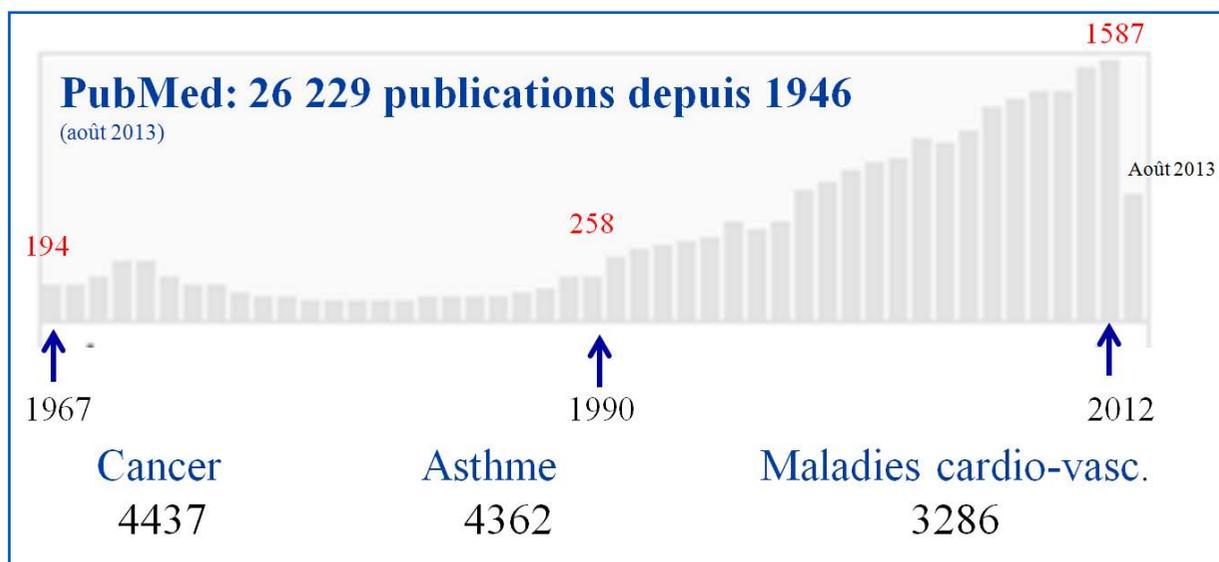


Figure 3

Évolution statistique du nombre de publications liées à la pollution atmosphérique dans PUBmed.

Statistical evolution of the number of publications about atmospheric pollution in PUBmed.

espérance de vie aux États-Unis au cours de la période 1980-2000 ; ce résultat est obtenu grâce aux mesures mises en œuvre pour maîtriser les sources de pollutions par les politiques publiques. Grâce à de tels travaux, il est possible de chiffrer le gain d'espérance de vie qu'on obtiendrait en réduisant les concentrations moyennes de particules jusqu'aux niveaux recommandés par l'OMS. C'est cette étude qui a été menée par l'InVS dans le cadre du projet Européen Aphekom⁵. Ainsi, les habitants de Budapest et de Bucarest gagneraient deux ans d'espérance de vie ; le gain serait d'environ six mois en France, ce qui encourage à continuer les politiques déployées dans les pays les plus avancés en matière de contrôle de la pollution de l'air.

Dans un article du *Lancet* de 2012⁶, le Global burden of disease (poids global des pathologies) mondial est estimé, ainsi que le poids des différents facteurs de risque. La pollution atmosphérique joue un rôle plus élevé en termes d'impacts sur la santé que le sida et les maladies infectieuses. Cette analyse définit quels sont les gros enjeux au niveau mondial : d'abord l'hypertension artérielle mais aussi la pollution atmosphé-

rique intérieure liée à la combustion, puis la pollution extérieure. Le coût sanitaire de la pollution atmosphérique est élevé, encore aujourd'hui, même dans les pays les plus avancés.

La situation se dégrade dans de nombreuses régions du monde, surtout dans les pays émergents et en développement. Les Chinois commencent à prendre en compte la gravité de la situation en constatant l'échec d'un modèle de développement économique intensif et prédateur, mais la maîtrise de la situation et les dispositions à prendre vont prendre du temps.

Comment évoluent les sources de pollution ?

Un certain nombre d'indicateurs permettent d'avancer des précisions. Les émissions d'oxydes d'azote, évaluées par le CITEPA, sont en baisse. Ces progrès sont liés aux contraintes imposées aux émissions des véhicules à moteur thermique. Entre les normes EURO des années 2000 et les normes EURO6 qui vont s'appliquer en 2015, on observe une amélioration considérable avec un abattement d'un facteur 30. La baisse est donc appréciable au niveau du pot d'échappement.

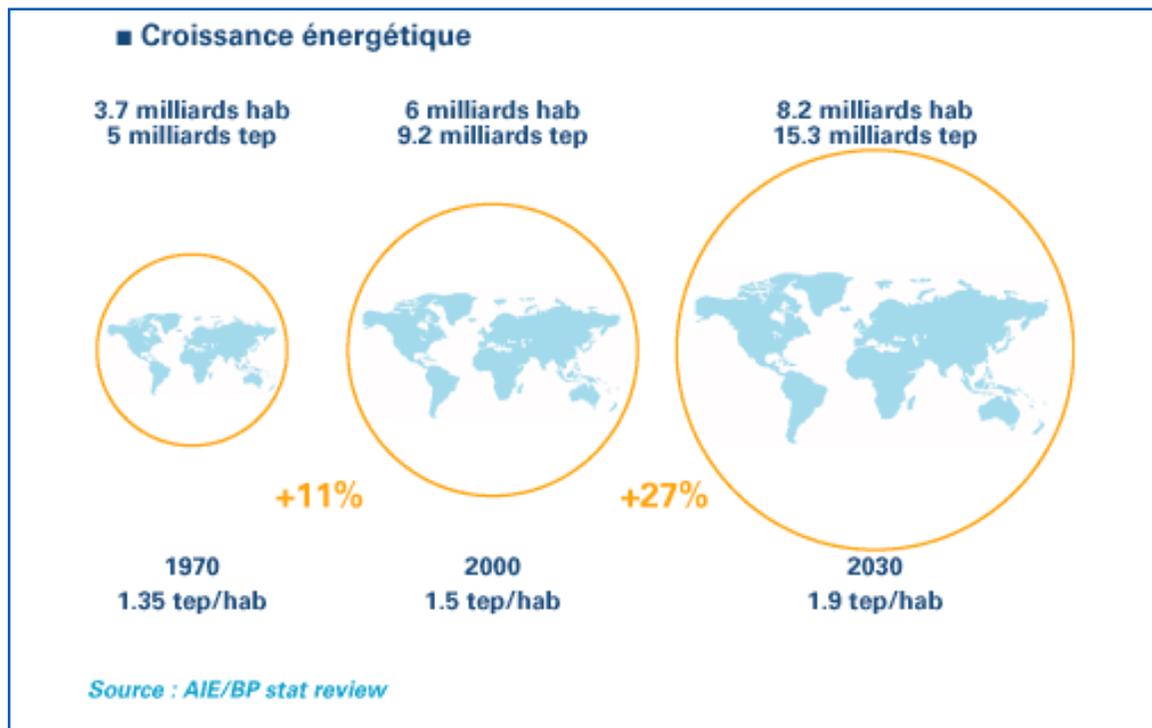


Figure 4

Statistiques 1970 et prévision 2030 de la croissance de la demande énergétique et de la demande pétrolière.

1970 statistics and 2030 forecast of the growth of energy and oil demand.

Pourtant, les concentrations restent stables en zone urbaine. Pour la France entière, la diminution des émissions est nette ; les émissions industrielles sont progressivement remplacées par les émissions liées au trafic. Or, compte tenu de l'ancienneté du parc, ce phénomène présente une grande inertie. Une mesure telle que la prime à la casse pour les véhicules les plus anciens pourrait avoir un impact favorable en supprimant brutalement du parc les véhicules les plus polluants.

La diesélisation croissante du parc des véhicules neufs mis sur le marché, notamment en France, et l'augmentation du nombre de véhicules sont responsables de l'émission de micro-et/ou nanoparticules depuis plus de 20 ans. Récemment, le classement par le CIRC (Centre International de Recherche sur le Cancer) des émissions diesel comme cancérigène de classe 1 a remis la focale sur la question du véhicule diesel. Les véhicules de tourisme ont une proportion élevée de moteurs diesel et, pour le fret, la part est écrasante.

Selon Airparif, en septembre 2012, la part du trafic dans les teneurs en particules dans l'air ambiant est de l'ordre de 50 % à proximité d'une infrastructure, et de 20 % quand on s'éloigne. C'est dire que de l'ordre de 20 % des particules contenues dans l'air ambiant sont liées au transport.

Transport et pétrole

Les transports des personnes et des marchandises représentent un tiers de la consommation finale d'énergie (25 % des GES, un tiers des émissions de CO₂). Cette consommation est surtout liée à la route (80 %). Le pétrole représente la source d'énergie quasi-exclusive (90 %) pour les véhicules motorisés. La demande s'accroît (figure 4), et cette tendance ne cesse de s'affirmer au plan mondial. Or les deux tiers de cette demande correspondent à la ville qui, comme Los Angeles, ne cesse de s'étendre.

Or le modèle économique des transports publics, pour être viable, nécessite de fortes densités.

En conclusion, les impacts de la pollution atmosphérique sur la santé sont importants. Même dans les pays « avancés », les gains en espérance de vie sont encore tributaires des progrès obtenus sur la qualité de l'air (et de l'eau ?). La situation progresse dans nos pays, mais la globalisation se traduit par le transfert de la pollution vers d'autres pays où la situation s'est considérablement dégradée en raison des modèles de développement adoptés. On peut donc se poser la question du différentiel entre d'un côté le gain d'espérance de vie dans les PED grâce à l'industrialisation et de l'autre les pertes liées à la pollution.

1. http://www.lemonde.fr/asi-pacifique/article/2013/01/28/chine-la-pollution-de-l-air-pousse-pekina-accepter-plus-de-transparence_1823481_3216.html

2. <http://www.ersnet.org/index.php/publications/air-quality-and-health.html>

3. Brook D, *et al.* (2010). Particulate matter air pollution and cardiovascular disease, an update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*, n° 121, p. 2331-2378.

4. C. Arden Pope, III, Majid Ezzati, Douglas W. Dockery. (2009). Fine-Particulate Air Pollution and Life Expectancy in the United States. *N Engl J Med*, n° 360, January 22, p. 376-386.

5. Improving Knowledge and Communication for Decision Making on Air Pollution and Health in Europe. [Enligne]. <http://www.aphekom.org/>

6. Stephen S Lim, Theo Vos, Abraham D Flaxman *et al.* (2012). A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990-2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. *The Lancet*, vol. 380, Issue 9859, 15 December, p. 2224-2260.

Quelques réflexions en contrepoint du colloque « Énergie et santé »...

Yves BRÉCHET¹

Introduction

Je me propose, dans cette contribution, de décliner quelques réflexions qui m'ont été inspirées par les conférences qui ont été données au cours du colloque. Je commencerai par les corrélations apparentes qui existent nécessairement entre énergie, climat et santé. Puis j'examinerai sur quelques cas les mécanismes sous-jacents et les impacts sanitaires liés à différentes sources d'énergie. J'aborderai ensuite la question du point de vue des systèmes énergétiques, c'est-à-dire allant au-delà de la question de la production, en incluant le transport, le stockage et l'usage de l'énergie. Je terminerai par une réflexion sur les risques sanitaires vus d'un point de vue sociétal : celui de la précarité, celui de l'acceptabilité.

Des corrélations attendues entre climat, énergie et santé

Le titre du colloque mentionne l'énergie et la santé, mais la grille de lecture que j'adopte, conformément à l'objectif de « Sauvons le climat », associe énergie, climat et santé dans une vision globale. Des corrélations simples s'imposent entre ces trois termes tout en se méfiant de la corrélation qui « n'est pas raison » (comme celle qui existe par exemple entre la natalité en Alsace et le nombre de cigognes !). Une corrélation de bon sens, assez claire, apparaît entre la consommation d'énergie et le revenu par habitant, ainsi qu'entre l'espérance de vie et ce même revenu. S'il y a une corrélation entre énergie et climat, et qu'il y a sans doute une relation entre espérance de vie et climat, il y aura nécessairement une corrélation entre énergie et espérance de vie. Et il est évident que de multiples raisons d'attendre une corrélation entre climat et santé existent, comme le montre par exemple la menace de la progression des moustiques, vecteurs de malaria, en direction des zones tempérées, associée avec le réchauffement climatique...

Des éléments systémiques, parfois un peu

vagues et simplement intuitifs, sont intéressants à mettre en lumière. Le changement climatique est vu comme un syndrome : augmentation des flux, de la démographie, de l'urbanisation, des désordres environnementaux... L'impact sur la santé publique est réel mais difficile à attribuer à l'énergie ou au climat ; cependant, on sait que le réchauffement climatique est lié à des pollutions qui ont un impact sur la biodiversité. Ces trois éléments, conjugués avec l'organisation sociale de la santé et le vieillissement de la population, ont pour conséquence la probabilité accrue de voir se multiplier des maladies de vieillesse. C'est en effet assez inévitable avec l'augmentation de l'espérance de vie, puisque, selon E. Saty, « devenir vieux arrive quand on vit longtemps ». Ce glissement vers les maladies du grand âge est une véritable « transition sanitaire ». La transition sanitaire s'effectue depuis les maladies infectieuses jusqu'aux maladies auto-immunes ou aux maladies de vieillissement, avec tous les aspects des risques toxiques sur les allergies et les maladies émergentes liées aux pollutions.

En résumé, le point de vue systémique peut s'énoncer simplement comme suit : « Les choix énergétiques influencent le changement climatique et les pollutions, lesquelles ont des conséquences sur la santé ».

Mais, bien sûr, la corrélation va bien au-delà de cette simple « quasi-tautologie », et il importe d'examiner les conséquences sanitaires de tout choix énergétique indépendamment de son influence potentielle sur le réchauffement climatique.

1. La production d'énergie et son influence sur la santé

Les effets sanitaires directs des différentes sources d'énergie dépendent fortement de la physique responsable du mode de production considéré. Il est important de garder en mémoire

que les effets sanitaires peuvent être continus (comme une centrale thermique qui rejette continuellement des particules dans l'atmosphère) ou accidentels (comme un barrage hydraulique qui cède). Contrairement à ce que les militants prétendent, il n'y a aucune preuve épidémiologique d'un impact sanitaire lié au fonctionnement d'une centrale nucléaire, par contre un accident nucléaire peut conduire à évacuer des populations pour éviter des risques sanitaires.

Cette distinction posée, examinons quelques cas de production d'électricité.

1.1 L'énergie nucléaire

Retenons d'abord qu'en situation non accidentelle, pour l'utilisateur, la dose et le débit de dose sont faibles. Dans son exposé sur les effets des faibles doses et des rayonnements ionisants, R. Masse nous dit très clairement qu'on connaît les effets des rayonnements ionisants depuis un siècle, et que l'actualisation annuelle des effets est effectuée à l'ONU depuis 60 ans. Il n'y a pas d'effets génétiques radio-induits connus chez l'homme, les cancers radio-induits sont rares, et leur fréquence croît avec la dose dérivée au-dessus de 100 millisievert. L'existence de pathologies non cancéreuses obéissant à une relation dose/réponse n'est pas établie en dessous de 500 millisievert. Il y a convergence complète entre les données de l'épidémiologie et les données expérimentales sur ce point. La compréhension détaillée des mécanismes d'endommagement par irradiation et de réparation est encore imparfaite, et il semble que des mécanismes d'autoréparation opèrent différemment suivant qu'on est au niveau de l'ADN, de la cellule, du tissu ou de l'organe. Plus l'ensemble est complexe, meilleure est la résistance, donc estimer les dangers sur la base de la biologie moléculaire seule conduit probablement à une prudence excessive. Cet énoncé est clair, et pourrait être simplement expliqué aux populations. Mais le problème est que cet état de fait ne parvient pas à émerger dans le public ; cet énoncé n'est pas anxiogène donc n'est pas vendeur, sans doute faut-il voir dans cette situation la cause du peu d'écho qu'il rencontre dans la presse... Montesquieu disait : « je préfère parler avec les paysans car ils ne sont pas assez instruits pour raisonner de travers ». Il faudrait garder cette phrase en tête...

Pour ce qui est des énergies carbonées : pétrole et gaz de schiste

La situation sanitaire associée à l'exploitation dépend très fortement du pays d'exploitation et de la réglementation minière qui y règne. Suivant que cette réglementation est rigoureuse ou non, l'exploitation des hydrocarbures conventionnels ou non conventionnels sera réalisée avec ou sans impact environnemental et sanitaire. Il en résulte que l'évolution dans le temps des impacts sanitaires est assez différent : dans les pays riches, l'amélioration est notable grâce à l'amélioration des standards, alors que la situation se détériore dans les pays émergents pour cause d'augmentation de la production. À partir de quel moment un pays émergent devient-il riche ? En termes de développement économique et de vision écologique de la ville, Shanghai nous donne des leçons dès maintenant sans attendre une dizaine d'années. Pour les gaz de schiste, les dangers sont maîtrisables et doivent être explorés, comme le montre une séance de l'Académie des sciences².

1.2 La biomasse

La biomasse est très variée, elle n'est pas utilisée uniquement pour l'énergie, elle sert également pour l'alimentation et la chimie. Les résidus de la biomasse sortent de la cheminée sous forme de particules et de gaz nocifs, ce qui interroge les bobos parisiens très attachés à voir leur bûche brûler dans la cheminée ! La première génération met le combustible en compétition avec l'alimentation. La seconde génération voit l'espace devenir son champ limitant. La troisième génération utilisera des algues pour fournir les huiles, à condition d'une bien meilleure maîtrise de leur métabolisme lipidique.

1.3 L'hydraulique

Le parallèle entre l'hydraulique et le nucléaire est trop rarement fait, du point de vue sanitaire : les deux sources d'énergie doivent bénéficier de localisations géographiques spécifiques ; les deux, dans un fonctionnement normal, sont assez bénins pour l'environnement ; les deux peuvent, en cas d'accident, rendre une région totalement inhabitable.

2. L'énergie et la santé pensées dans une vision système

Quand on pense énergie, quel que soit le point

de vue (et l'aspect sanitaire ne fait pas exception), il est indispensable de garder à l'esprit le triptyque « Production/transport/stockage et utilisation ». Oublier l'un de ces aspects conduit invariablement à des errements.

La section précédente traitait des sources d'énergie, la section présente de son transport, de son usage, de son stockage.

2.1 Question du choix du mix énergétique

Les différentes versions de mix énergétique qui circulent font sentir le besoin urgent de cours d'arithmétique... La nature même du vecteur énergétique électrique suppose une adéquation entre la production et la consommation, en gérant le temps avec les aspects de stockage et l'espace avec les réseaux. Ceci est encore plus vrai pour les énergies intermittentes. Il faut expliciter quelles sont les mesures de comparaison adoptées : émissions de CO₂, coût du kW/h, sur le taux de pollution. Les objectifs qu'on se donne sont de nature politique, mais la science doit définir des possibilités et estimer les conséquences des choix effectués. Ceci suppose de faire converger l'analyse des méthodes des conseils scientifiques français, anglais et allemand pour définir quelles sont les questions à poser au mix énergétique avant de le choisir. En effet, les lois de Carnot ne changent pas en traversant la Manche mais les conditions initiales sont très différentes dans chaque pays donc il n'y a pas de raison d'arriver aux mêmes solutions. Cependant, il faut sortir de la situation actuelle dans laquelle chaque pays choisit sa propre énergie, alors que ces mêmes pays sont fortement couplés. La question des risques systèmes associés à l'intermittence est inquiétante. Les conséquences d'une rupture de production d'électricité me semblent dangereuses et pas seulement dans les hôpitaux mais aussi sur tous ceux qui utilisent l'électricité dans leur maison ; en particulier pour les asthmatiques et pour ceux qui sont sous dialyse, mais également pour toutes les opérations qui dépendent de systèmes électroniques à petites échelles donc sans alternative au courant apporté par le réseau. Si le *blackout* touche une ville ou un département, c'est jouable, EDF a des groupes d'intervention d'urgence. Mais imaginons que, par un effet domino, tout le pays soit privé d'électricité, par contagion d'un *blackout* venu d'Allemagne, il y a gros à parier que les services d'urgence d'EDF vont avoir du mal à répondre à la demande. On n'a pas le droit, en tant que scientifique, d'attendre

la catastrophe pour se poser des questions.

2.2 Problèmes sanitaires associés au transport

Le transport par les lignes à haute tension a suscité des oppositions pour des raisons de paysage... Aujourd'hui, l'opposition est liée à l'impact sanitaire supposé des ondes électromagnétiques. Il a été surabondamment prouvé que cette crainte est infondée, mais cela reste un obstacle au transport. On peut se poser la question d'un autre vecteur énergétique comme l'hydrogène. Mais il faut alors poser la question du temps. On ne change pas rapidement un système qui restera pendant de nombreuses décennies fondé sur l'électricité. L'économie décarbonée suppose une composante électrique qui va augmenter ; il faut alors que l'électricité soit décarbonée. Même si cette énergie est imparfaite car elle est difficile à stocker, elle reste un vecteur propre qui a peu d'impact sur la santé publique.

2.3 Problèmes sanitaires associés au stockage

Qui dit énergie renouvelable et réseau dit intermittence et nécessité de stockage. À ce jour, le seul mode de stockage massif est le pompage d'eau dans les barrages, qui n'a aucun impact sanitaire. Les batteries peuvent par contre contenir des matériaux toxiques.

3. L'énergie et la santé pensées dans une vision sociétale

3.1 Quelques réflexions sur les leçons du débat public

Je conseille à tous ceux qui s'intéressent à la question de la relation entre la science et la société de lire le livre intitulé *Le laboratoire*, écrit par un véritable honnête homme, J. Faucheux. Cette question de gestion des déchets radioactifs est extrêmement passionnelle et chargée de connotations sanitaires. Pourtant, les actinides sont confinés dans l'argile et les produits de fission dans les verres de stockage. Pourtant, dans le laboratoire de stockage de Bures, pour assurer l'acceptation par la population de la décision d'enfouissement, on a donné une assurance de réversibilité qui, au contraire de diminuer le risque

sanitaire, l'augmente potentiellement. Comme exemple de gestion saine du débat public sur le même sujet, on peut citer l'expérience de SKB en Suède, entreprise privée à laquelle les Suédois ont fait confiance pour choisir et sélectionner le site pour stocker les déchets nucléaires. Ils ont pris le temps avant de choisir. Pendant 15 ans, ils n'ont jamais fait une réunion avec plus de vingt personnes ; en revanche, trois soirs par semaine, le directeur a pris le temps de discuter avec tous les habitants. Le résultat est que, dans la tradition d'un certain nombre d'organisations, au moment de la décision, des individus ont débarqué pour prendre la parole à la place des autochtones qui ne se sont pas laissés faire après 15 ans de confiance, de patience et d'honnêteté. C'est un bel exemple de débat public et aussi de rémanence, car ce type d'attitude en Suède remonte au temps des Vikings. En France, on n'improvisera pas mais on peut s'enrichir de l'expérience des autres.

3.2 La précarité énergétique

Cette notion est de nature économique et sociétale, mais elle n'en demeure pas moins essentielle dans la notion d'impact de l'énergie sur la santé. Les choix d'énergies renouve-

lables conduisent à un renchérissement conséquent du prix de l'électricité. Il est impératif que les aspects économiques soient pris en compte, car on n'a pas la même perception des besoins énergétiques et de l'impact sur la santé quand on habite à Malakoff ou au Trocadéro. Et un surcoût sur l'énergie, pénalisant les plus pauvres, ne peut manquer d'avoir un impact sanitaire. Marcel Boiteux résume cela joliment en parlant « d'éclairer une assiette vide ».

Conclusions

Au terme de ces quelques variations sur les thèmes abordés au cours du colloque, résumons les facettes variées du problème sanitaire. J'ai essayé de mettre en relation climat, énergie et santé, allant des simples interconnexions fortuites, continuant par une esquisse des impacts sanitaires des différentes sources d'énergie, montrant ensuite comment la prise en compte du système production/transport/stockage peut, lui aussi, avoir un impact. Et nous avons montré enfin comment des exigences sociétales venaient corser le tout d'une bonne dose de prosélytisme ou de craintes irrationnelles.

1. Haut-commissaire à l'énergie atomique, membre de l'Académie des sciences.
2. <http://www.academie-sciences.fr/video/v260213.htm>



Sauvons Le Climat Le devenir du climat : pourquoi agir ?

7^e université d'été Bordeaux

2 au 4 octobre 2014

L'association « Sauvons Le Climat » organise à Bordeaux sa 7^e université d'été du 2 au 4 octobre 2014.

La terre se réchauffe depuis le milieu du XIX^e siècle. Ce réchauffement, qui s'est fortement accéléré dans le dernier quart du XX^e siècle, porte de nombreuses traces de l'action de l'homme sur le climat. Cette évolution du climat se manifeste de multiples façons, et en particulier par un réchauffement des eaux océaniques, entraînant une diminution des surfaces émergées, une modification du régime des pluies, une importance croissante des événements extrêmes... Les impacts sur notre environnement, déjà visibles, vont s'amplifier dans les décennies à venir et pour des siècles, avec des conséquences notables pour la société. Dans son action pour limiter le réchauffement climatique, l'association « Sauvons Le Climat » organise son université d'été de 2014 sur le thème du devenir du climat et de ses conséquences sous l'action de l'homme.

Bordeaux est un site de choix pour notre université. Alain Juppé, le maire de la ville, a toujours manifesté un grand intérêt pour les questions environnementales. La capitale de la région Aquitaine, a fait récemment appel à de grands spécialistes coordonnés par Hervé Le Treut pour établir un état des lieux des connaissances et des impacts régionaux du réchauffement.

Orientée plutôt vers un public ayant un certain niveau de culture scientifique, notre université sera précédée d'une conférence débat ouverte au grand public : des personnalités scientifiques fortement impliquées dans les études sur le réchauffement et ses conséquences, introduiront le débat par une brève présentation de l'état des connaissances de leur domaine. La parole sera ensuite donnée à la salle pour un large échange entre le public et les spécialistes. Chacun aura ainsi la possibilité d'obtenir les explications et les informations sur les points qui lui tiennent à cœur.

L'université proprement dite se présentera sous la forme d'une série de conférences données par les plus grands spécialistes du domaine, mais accessibles à toute personne ayant un minimum de culture scientifique. Après une présentation approfondie du réchauffement global, nous aborderons des aspects marquants des impacts de ce réchauffement et de l'augmentation de la concentration atmosphérique du dioxyde de carbone, ainsi que quelques moyens utilisables pour limiter ou contrer le réchauffement. Seront notamment mis en regard les mérites et les risques, des actions de prévention pour limiter le réchauffement et des actions d'adaptation pour en limiter les impacts sur notre vie.

L'université se tiendra à l'hôtel Ibis Meriadeck. Les informations détaillées ainsi que les modalités d'inscription sont sur le site Internet de « Sauvons Le Climat » <http://www.sauvonsleclimat.org/>



Sauvons Le Climat

Le devenir du climat : pourquoi agir ?

7^e université d'été Bordeaux

2 au 4 octobre 2014

PROGRAMME

Jeudi 2 octobre. 18h30

18h30 Conférence débat ouverte au public sur *le réchauffement et ses impacts* avec **Valérie Masson-Delmotte** (LSCE / IPSL), **Nathalie Ollat** (INRA Bordeaux), **Denis Salles** (IRSTEA).

Discours d'ouverture par **Monsieur Alain Juppé**, maire de Bordeaux

Vendredi 3 octobre 9h - 12h45 ; 14h - 18h30

L'évolution du climat

Le passé du climat, leçon pour l'avenir par **André Berger** (Université Catholique de Louvain-la-Neuve)

Impacts des émissions de CO₂ sur les océans

Montée du niveau de la mer par **Philippe Maisongrande** (LEGOS)

Acidification des océans, causes, conséquences et solutions par **Jean-Pierre Gattuso** (Laboratoire d'océanographie de Villefranche)

Risques

Les événements extrêmes : des papillons et des cygnes noirs, les facéties du climat par **Pascal Yiou** (LSCE/IPSL)

Risques climatiques et société par **François Gémene** (Sciences Po)

Les dangers des combustibles fossiles (autres que l'effet de serre) par **Bernard Durand** (géochimiste des combustibles fossiles)

Aspects économiques

Débats économiques autour des politiques climatiques par **Roger Guesnerie** (professeur honoraire au Collège de France)

Samedi 4 octobre. 9h - 12h30 ; 14h15 - 16h30

Quelques voies pour limiter l'accumulation du CO₂

Hybridation/complémentarité des énergies par **Henri Prévot** (ingénieur général des Mines)

Captage/stockage du CO₂ par **Pascale Bénézeth** (Laboratoire de Géosciences Environnement, Toulouse)

Géo-ingénierie par **Benoit de Guillebon** (APESA)

Bilan de l'université

Synthèse des présentations

Les conclusions de l'université par **Hervé Le Treut** (IPSL, académicien)

Discours de clôture par **Madame Anne Walryck**, vice-présidente de la Communauté urbaine de Bordeaux

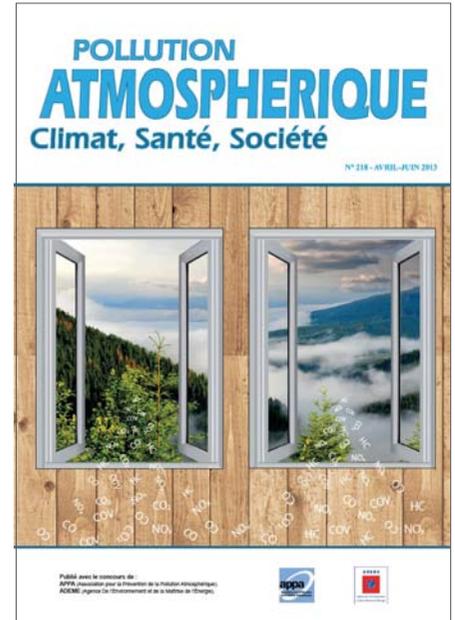
NUMÉROS TRIMESTRIELS



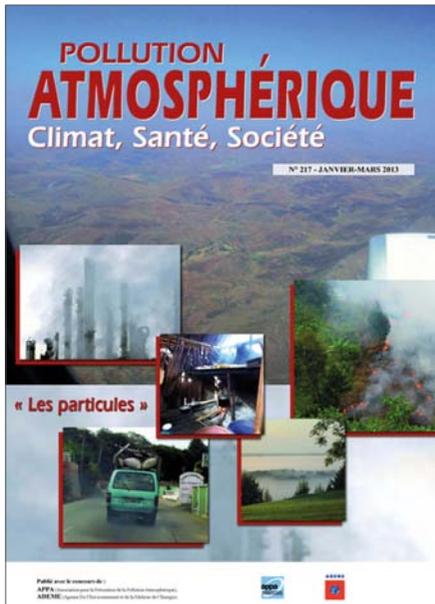
Octobre - Décembre 2013



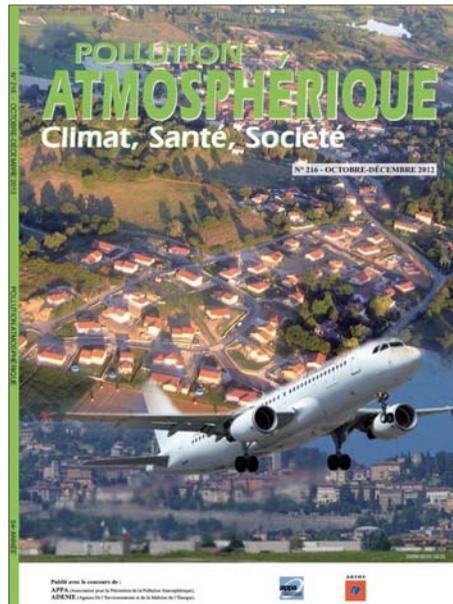
Juillet - Septembre 2013



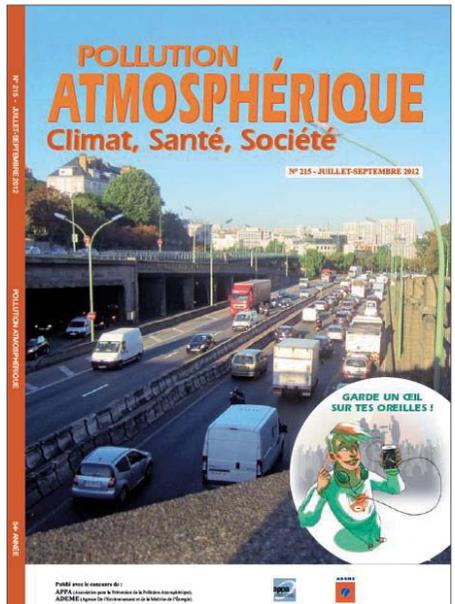
Avril - Juin 2013



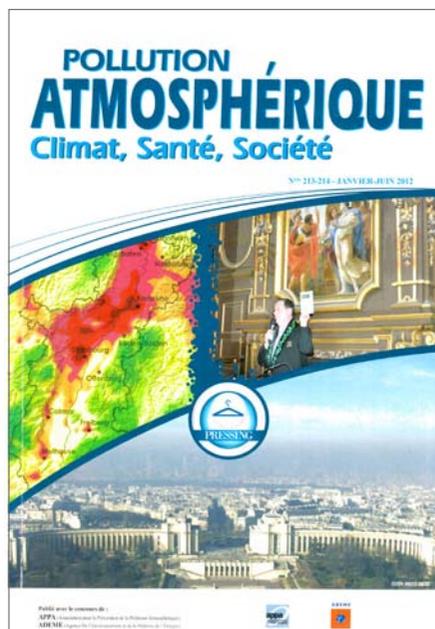
Janvier - Mars 2013



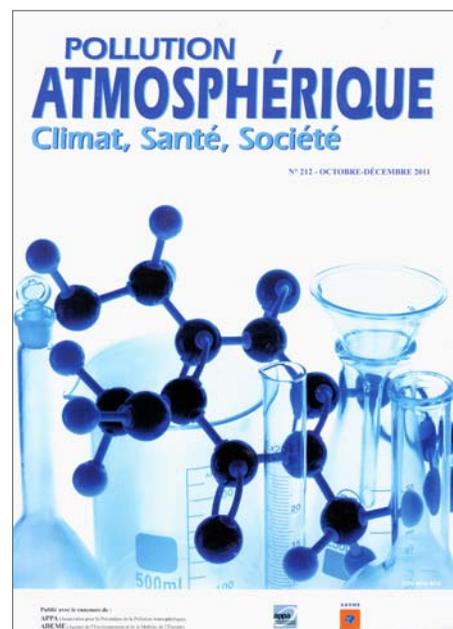
Octobre - Décembre 2012



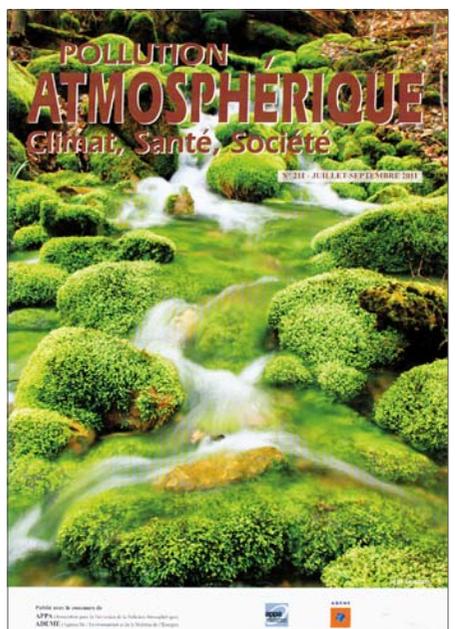
Juillet - Septembre 2012



Janvier - Juin 2012



Octobre - Décembre 2011



Juillet - Septembre 2011