

La problématique de l'énergie, la place de l'électricité

D'après une illustration de Bernard Multon - Ressources énergétiques renouvelables

Publication trimestrielle du Cercle Thématique 13.01 de la SEE

ENSEIGNER L'ELECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE



Société de l'Electricité, de l'Electronique et des Technologies de l'Information et de la Communication

N° 36 - Mars 2004

L'électronique et l'électrotechnique chez **DUNOD**



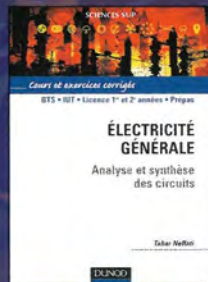
ISBN 2 10 006939 X • 27 €



ISBN 2 10 005810 X • 61 €



ISBN 2 10 006940 3 • 24 €



ISBN 2 10 006844 X • 22,50 €



ISBN 2 10 007036 3 • 29,90 €



ISBN 2 10 005714 6 • 23 €



ISBN 2 10 007954 9 • 22 €

OUVRAGES EN VENTE EN LIBRAIRIE



accès direct au catalogue
www.dunod.com



La REE, revue professionnelle incontournable dans le domaine de l'Électricité, de l'Électronique et des NTIC, propose à ses lecteurs des articles diversifiés

regroupés sous forme de "Dossiers" et "Repères", des entretiens, des rubriques pratiques, des analyses : une somme d'informations les plus actuelles, une matière éditoriale de haute tenue, une large partie magazine et nouveaux produits.



Revue de la SEE
17, rue Hamelin
75783 Paris Cedex 16 - FRANCE
Tél : 33 (0)1 56 90 37 12
Fax : 33 (0)1 56 90 37 19
www.see.asso.fr



Editeur :
EDP SCIENCES
17, av. du Hoggar - BP 112
91944 Les Ulis Cedex A - FRANCE
www.edpscienze.org/REE
Tél : 33 (0)1 69 18 75 75 -
Fax : 33 (0)1 69 86 06 78
Subscribers@edpscienze.org

Abonnement 2004

Coupon à retourner à EDP Sciences,
17 av. du Hoggar - BP 112
91944 Les Ulis Cedex A - France

Oui je m'abonne à la REE.
10 Numéros (dont un numéro double)
(ISSN : 1265-6534)
 France & UE 149 € (TVA 2,10% incluse)
 Reste du monde 155 € (Prix HT)

Nom et prénom (ou raison sociale) :

Service/département :

Activité (facultatif) :

Adresse :

Code postal :

Ville :

Pays :

e-mail :

Je règle par : chèque à l'ordre de la SEE/Revue 3 E.I.

carte bancaire (visa, Eurocard, American Express)

N° carte : []

Date de validité : []

Signature et cachet : _____ Date : []

Conformément à la Loi Informatique et Libertés du 06/01/1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux informations qui vous concernent. Contacter le Service Gestion des Adhésions de la SEE (adhésion@see.asso.fr ou Tél. : 01 56 90 37 12).



SOCIÉTÉ de l'ELECTRICITE, de l'ELECTRONIQUE et des TECHNOLOGIES de l'INFORMATION et de la COMMUNICATION.

17, rue Hamelin, PARIS 75 783 CEDEX 16
Tel : 01 56 90 37 00 Fax : 01 56 90 37 19
site web : www.see.asso.fr

La Revue 3EI

publication trimestrielle
du Cercle Thématique 13-01
de la SEE

SEE, association reconnue d'utilité publique par le décret du 7 décembre 1886
Siret 785 393 232 00026, APE 731 Z, n° d'identification FR 44 785 393 232

3EI : Enseigner l'Électrotechnique et l'Électronique Industrielle.

<p>La Revue 3EI, Édition SEE, 17 rue Hamelin 75 783 PARIS CEDEX 16</p> <p>Directeur de la publication Jean-Gabriel REMY Président de la SEE</p> <p>Rédacteur en Chef François BOUCHER</p> <p>Adresser les propositions d'article à F. Boucher : revue3ei.art@voila.fr</p> <p>Communication Micheline BERTAUX communication@see.asso.fr</p> <p>Publicité en Régie MISTRAL MEDIA Directeur commercial : Luc LEHERICY 72 avenue du D^r ArnoldNETTER 75 012 PARIS Tel : 01 40 02 99 00 Fax : 01 40 02 99 01</p> <p>Abonnement (4 numéros par an) déc. 2003, mars, juin, sept. 2004. tarifs TTC : Individuel : France et CEE.....32 € Pays hors CEE.....42 € Collectivités France et CEE.....48 € Pays hors CEE.....63 €</p> <p>Réalisation et impression Repro-Systèmes 23, rue de Verdun 77 181 Le Pin</p> <p>Routage et Expédition Départ Presse ZI les Richardets 93 966 Noisy le Grand</p> <p>Dépôt Légal : mars 2004</p> <p>Commission Paritaire 1207 G 78028 ISSN 1252-770X</p>	<p style="text-align: right;">Sommaire du n°36</p> <p style="text-align: center;">Thème : la problématique de l'énergie, la place de l'électricité.</p> <p>p. 2 Éditorial,</p> <p>p. 3 Compte-rendu des Journées " Électrotechnique " du Club EEA ; Publications.</p> <hr/> <p>p. 9 La Revue 3EI et l'énergie. Michel MEUNIER, MMEC, 91 390 Morsang sur Orge.</p> <p>p. 11 La demande mondiale d'énergie sur le long terme. Marie-Hélène LAURENT, Gwennael SALAUN, EDF, Groupe prospective énergétique et appui stratégique, 77 818 MORET SUR LOING.</p> <p>p. 20 Situation énergétique mondiale à l'aube du 3^{ème} millénaire. Perspectives offertes par les ressources renouvelables. Bernard MULTON, Gael ROBIN, Marie RUELLAN, Hamid BEN AMHED, Antenne de Bretagne de l'École Normale Supérieure de Cachan, 35 170 Bruz.</p> <p>p. 34 Influence de l'activité humaine sur les changements climatiques. Gérard MÉGIE, université Pierre et Marie Curie, Jean JOUZEL, institut Pierre Simon Laplace.</p> <hr/> <p style="text-align: right;">Publications pédagogiques</p> <p>p. 48 Notions de fiabilité. Gérard LACROUX, ancien Directeur technique des établissements RAGONOT.</p> <p>p. 50 Étude et réalisation d'un convertisseur auto-oscillant. Application à une alimentation de type " Flyback ". Dominique JACOB, Département GEII, IUT de Poitiers</p> <hr/> <p style="text-align: right;">Histoire des sciences et des techniques.</p> <p>p. 65 L'évolution de l'électronique de puissance en traction ferroviaire : l'ère des thyristors, leurs applications en traction à moteurs sans collecteur. Christian LECLERC, Ingénieur Honoraire de la SNCF</p> <p>p.73 Histoire de l'électricité : l'électron. Jean-Claude BOUDENOT, THALES R & T, Domaine de Corbeville, 91 404 Orsay</p>
---	---

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans la présente édition, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'oeuvre dans laquelle elles sont incorporées.

Toutefois des copies peuvent être utilisées avec l'autorisation de l'éditeur. Celle-ci pourra être obtenue auprès du Centre Français du Droit de Copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris, auquel la Revue 3EI a donné mandat pour la représenter auprès des utilisateurs. (loi du 11 mars 1957, art.40 et 41 et Code Pénal art. 425).

L'énergie, thème d'une nouvelle série

Ce numéro 36 de La Revue 3EI est le premier d'une série de numéros dont les thèmes aborderont le problème de l'énergie et la place occupée par l'électricité dans l'utilisation de celle-ci.

En juin prochain, le n°37 abordera les gros moyens de production d'électricité, en décembre, le n°39 traitera quant à lui les moyens de productions décentralisées ; le transport de l'électricité et la gestion du réseau constitueront les thèmes des n°s 41 et 43.

Merci Michel MEUNIER

L'initiative du traitement, dans La Revue 3EI, de ce très vaste thème d'actualité revient à Michel MEUNIER qui fait une présentation, en pages 7 et 8, du plan que le comité de publication a adopté.

Michel MEUNIER, que les lecteurs ont connu comme professeur à Supélec, change d'activité professionnelle et ses nouvelles charges de travail ne lui permettant plus de participer efficacement et régulièrement aux activités de notre groupe, a décidé de le quitter.

L'ensemble des membres de l'équipe de publication de La Revue 3EI le remercie du travail qu'il a accompli dans le cadre de cette revue, mais aussi dans la réalisation et sa participation active et efficace au succès des différentes Journées'3EI, de 93 à 2003.

Monsieur Patrick BASTARD, professeur à Supélec, que nos lecteurs connaissent déjà, prendra sa succession.

Continuez de nous faire part de vos expériences

Le numéro de décembre 2003, (n°35) abordait l'usage de l'outil informatique dans l'enseignement ; ce sujet n'est pas clos, d'autres articles sur ce thème vont être publiés. Il est souhaitable que vous continuiez à nous faire-part de vos expériences. Le numéro de septembre est, depuis la création de la revue, consacré en priorité aux articles à caractère pédagogique ; il serait bien que vous nous fassiez parvenir, entre autres, des articles sur ce thème dont les domaines d'applications sont très variés.

A vos claviers, nous comptons sur vous.

La Revue 3EI

Comité de publication

Jean BONAL
François BOUCHER
Jean-Claude BOUDENOT
Gérard DELAVIER
Lucien DESCHAMPS
Jean FAUCHER
Gilles FELD
François FOREST
Brigitte GRELAUD
Jean-Philippe ILARY
Chérif LAROUCI
Michel LAVABRE
Marie Michèle LE BIHAN
Pascal LOOS
Michel MEUNIER
Bernard MULTON
Claude OBERLIN
Oviglio SALA
Jean-François SERGENT

Site WEB 3EI

(<http://www.lesite3EI.com>)

Responsable :
Philippe LE BRUN

Jean-Pierre TAREL
Jean-Philippe ILARY

Pour vos insertions
publicitaires, contacter :

MISTRAL MÉDIA

Vivian FAVRO
72, Av^e du D^r Arnold NETTER
75 012 Paris
Tel : 01 40 02 99 00

Abonnement à la Revue 3EI, année 2003-2004 :
Numéros : 35 (décembre 2003), 36 (mars), 37 (juin) et 38 (septembre 2004).

<u>Abonnement individuel :</u>	<u>Abonnement collectif souscrit par bon de commande (bibliothèque, CDI, laboratoire, entreprise, etc.)</u>
France et Pays de la CEE : 32 €, TTC	France et Pays de la CEE : 48 €, TTC
Pays hors CEE : 42 €, TTC	Pays hors CEE : 63 €, TTC

Une seule adresse :

La Revue 3EI - SEE,
17, rue Hamelin, 75 783 PARIS Cedex 16

pour nous contacter au sujet de votre abonnement écrivez à
revue3ei.cour@voila.fr



Journées 2004 de la section
électrotechnique du club EEA
« Avion et électricité »



Compte-rendu

Eric Monmasson, Université de Cergy-Pontoise

Les 18 et 19 mars 2004 se sont déroulées à l'Université de Cergy-Pontoise (UCP) sur le site de Neuville les 27^{ème} journées de la section électrotechnique du club EEA. Ces journées, à l'initiative de l'antenne du Laboratoire Systèmes et Applications des Technologies de l'Information et de l'Énergie (SATIE, UMR CNRS 8029) de l'UCP et du département de formation IUP GEII, ont réuni 92 participants ainsi qu'une vingtaine d'étudiants de 3^{ème} cycle (inscrits en DEA de Génie Électrique de Paris, en DESS Thermique et régulation de l'UCP et de Paris 7 ou encore en DESS Intégration des Systèmes de Puissance de Paris 11).



Des congressistes attentifs

L'objectif principal d'une telle manifestation réside dans la diffusion des savoirs. Plus précisément, il s'agit de faire le point sur une thématique porteuse de l'électrotechnique et ce, dans un souci de transfert des résultats de recherche vers l'enseignement. Prenant en compte le nombre toujours plus important de travaux de recherche dans la communauté électrotechnique en relation avec le domaine avionique, les organisateurs avaient proposé pour ces journées le thème : « Avion et électricité, de l'électrotechnique haute performance ».

En effet, à l'instar d'autres moyens de transport tels que les automobiles ou les navires, la part de l'énergie électrique au sein des avions est croissante. A titre d'exemple, les actionneurs hydrauliques de commande de vol sont remplacés par des actionneurs électro-hydrauliques (EHA, Electro Hydrostatic Actuator) plus performants, plus fiables et moins lourds. Cependant, l'accroissement des dispositifs électriques, outre les problèmes de conception des actionneurs et de

l'électronique de puissance associée qu'il pose (fortes contraintes des systèmes embarqués : volume, masse, température et compatibilité électromagnétique), génère également un important effort de recherche en matière de réseau de bord et ce, tant du point de vue de la génération d'énergie que de la gestion du réseau (stabilité, dépollution harmonique).

C'est à ces questions que les 16 intervenants, pour la plupart chercheurs dans les principaux Laboratoires de génie électrique français, ont tenté de répondre. En outre, la vitalité des liens entre la recherche dans ce secteur et le monde industriel est attestée par les deux chiffres suivants :

- environ 20% des participants étaient des industriels bien que le but de ces journées soit essentiellement pédagogique,
- les deux tiers des articles présentés étaient co-signés par un Laboratoire de recherche et par une entreprise.

Les journées se sont déroulées ainsi :

Le président de l'UCP, René Lasserre a tout d'abord ouvert le colloque en rappelant à cette occasion la place importante réservée aux formations professionnelles et à la recherche associée au sein de l'UCP. Sylvain Allano, Directeur du Laboratoire SATIE et Jean-Yves Le Huerou, Directeur de l'IUP GEII ont également accueilli les participants. Georges Zissis, Président de la section électrotechnique du club EEA a remercié au nom du club, le Président Lasserre d'avoir permis l'organisation de ces journées.

Les interventions étaient réparties en quatre sessions, une par demi-journée.

La première session avait pour thème les réseaux de bord d'avion. Cette session était animée par Xavier Roboam du LEEI de Toulouse et Nicolas Retière du LEG de Grenoble.

Olivier Langlois d'AIRBUS et actuellement en thèse au LEEI, a présenté un état de l'art des réseaux de bord et donné les perspectives dans ce domaine. Il a également rappelé les équipements qui au sein des avions relevaient déjà de l'énergie électrique (commande de vol de type EHA) et ceux qui demain seraient appelés à « s'électrifier » (train d'atterrissage, inverseur de poussée...).

Dans la seconde intervention, Serge Pierfederici du GREEN de Nancy a présenté une étude concernant la stabilité des systèmes distribués que sont les réseaux de bord d'avion.



La troisième intervention, présentée par Philippe Ladoux du LEEI de Toulouse était consacrée à l'intérêt du filtrage actif et du redressement actif à absorption sinusoïdale afin d'améliorer la qualité des réseaux électriques de bord. En effet, les nombreuses charges dites « commerciales » qui absorbent des courants non sinusoïdaux sont susceptibles de déformer les tensions délivrées par les générateurs et ainsi de perturber le fonctionnement d'équipements vitaux.

Enfin, dans le dernier exposé de cette session, Nicolas Retière a présenté un projet pédagogique réalisé par les étudiants du nouveau master CSEE (Conception des Systèmes d'Energie Electrique) à Grenoble. Ce projet porte sur le dimensionnement de filtres passifs destinés à réduire l'influence des nombreux convertisseurs statiques polluants que l'on retrouve dans les réseaux embarqués.



Actionneur électro-hydraulique pour Airbus A320

La seconde session, animée par Mohamed Gabsi du SATIE et Farid Meibody-Tabar du GREEN était centrée sur le dimensionnement d'actionneurs électromagnétiques et piézoélectriques pour l'avionique.

Dans un premier temps, Hamid Ben Ahmed du SATIE antenne de Bretagne a dressé un état de l'art exhaustif des actionneurs linéaires directs et indirects. Ce dernier a notamment fourni un grand nombre de clefs de dimensionnement fort utiles aux concepteurs d'actionneurs.

Puis, Jean-Claude Vannier de SUPELEC a présenté de façon détaillée un exemple d'étude industrielle. Il s'agissait de la conception d'un ensemble convertisseur actionneur électrique et pompe dédié à un système d'alimentation en carburant sur satellite.

Dans la continuité du précédent exposé, une seconde étude industrielle a été présentée par Gilles Coty de la société Précilec. Cette étude concernait la réalisation d'actionneurs électriques de commande de vol pour drone d'hélicoptère.

Enfin, cette session s'est terminée par l'exposé de Jean-François Rouchon du LEEI qui a parlé des enjeux des actionneurs piézoélectriques face aux applications aéronautiques.

La troisième session, animée par Maurice Fadel du LEEI et Alain Bouscayrol du L2EP de Lille avait pour sujet la commande des actionneurs et des générateurs.

La première intervention a été présentée par Flavia Khatounian doctorante du SATIE, antenne de Cergy.

Cette dernière a décrit les principes et l'intérêt d'une commande vectorielle pour piloter une génératrice asynchrone à double alimentation dans le cas d'une application avionique. Flavia Khatounian a également proposé le dimensionnement d'un filtre passif LC afin de filtrer les harmoniques de courant introduits par les charges polluantes.



Processeur BRISC2 dédié aux applications avioniques

Puis, Mario Martinez et Jean-Yves Midy de la société THALES AES ont présenté l'étude complète (conception et commande) d'un alternateur homopolaire inertielle prévu pour être utilisé sur un véhicule de combat tout électrique. La caractéristique principale de ce système était de permettre l'utilisation lors des phases critiques de fonctionnement de l'énergie cinétique stockée.

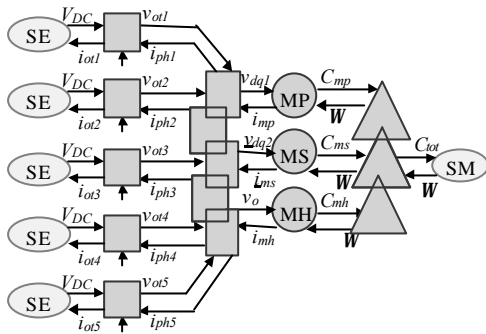
La troisième présentation (Maurice Fadel du LEEI) a porté sur les commandes sans capteur mécanique des actionneurs embarqués de type machine synchrone. Dans ce cadre, différentes méthodes d'observation de la position rotorique ont été présentées.



Alternateur homopolaire inertielle sur son banc d'essai

La session s'est terminée par l'exposé de Eric Gilson de la société SABCA. Durant sa présentation Eric Gilson s'est plus particulièrement intéressé au problème de l'implantation temps réel des algorithmes de commande. Il a notamment présenté le processeur BRISC2 dédié à la commande d'actionneurs électriques critiques en avionique.

La quatrième et dernière session avait pour thème la fiabilité et la qualité à la fois des dispositifs d'électronique de puissance et des machines électriques. Cette session était animée par Régis Meuret de la société Hispano-Suiza et Stéphane Lefebvre du SATIE.



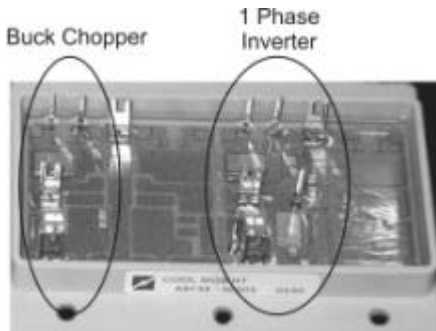
Formalisme SMM, machine synchrone pentaphasée

Cette session a débuté par la présentation de Laurent Dupont doctorant de l'INREST de Cachan. Laurent Dupont a dressé un panorama des composants à semi-conducteur de puissance susceptibles de convenir à des applications à haute température de fonctionnement.

Lors du second exposé François Costa du SATIE a parlé du protocole d'identification des sources équivalentes de mode commun dans les convertisseurs statiques, courant de mode commun pouvant engendrer des perturbations multiples.

Puis, Eric Semail du L2EP de Lille a présenté l'intérêt des machines polyphasées pour le secteur avionique. Eric Semail a notamment insisté sur la relative facilité de pilotage de ces machines lorsqu'on utilise un formalisme adapté. L'utilisation de ces machines permet également d'envisager des modes de marche dégradée en cas de problème.

Enfin, Farid Meibody-Tabar du GREEN de Nancy a présenté plusieurs architectures segmentées d'alimentation à convertisseurs modulaires pour les actionneurs d'avion, ces architectures segmentées devant permettre, là encore, un fonctionnement en mode dégradé en cas de défaut.



Démonstrateur de coolMos SI 600V – 47A

En dehors des sessions techniques proprement dites et à l'issue de la première journée, le prix Edmond Gudefin récompensant la meilleure thèse en génie électrique pour l'année écoulée, a été remis à Nicolas Siauve du CEGELY de Lyon pour ces travaux sur la modélisation par éléments finis des phénomènes électromagnétiques en hyperthermie et l'optimisation des applicateurs.

Ces journées se sont terminées autour de la traditionnelle table ronde visant à évaluer les retombées pédagogiques de ces journées. Cette table

ronde était animée par Marie-Michèle Le Bihan du lycée Jules Ferry de Versailles, Christian Glaize du LEM de Montpellier et Bernard Multon du SATIE, antenne de Bretagne. Les trois animateurs ont pris à tour de rôle la parole posant ainsi les cadres du débat.

Marie-Michèle Le Bihan était satisfaite de ce que les fondamentaux (bases de l'électromagnétisme, des convertisseurs statiques et des machines tournantes) des systèmes présentés lors de ces journées sont enseignés en BTS. En ce qui concerne les technologies non couvertes par le programme de BTS et qui ont pourtant été vues durant ce colloque, telles que les actionneurs piézo-électriques, elles peuvent aisément faire l'objet d'un exposé par un groupe d'étudiants. Marie-Michèle Le Bihan a poursuivi en relevant le côté systémique des applications avioniques. En effet, dans un réseau de bord chaque élément (générateurs, charges, filtres) interagit sur les autres du fait des contraintes importantes qui existent dans les systèmes embarqués (consommation énergétique limitée, proximité des éléments entre-eux...). Cependant, aussi riches que soient ces applications, elles n'en demeurent pas moins difficiles à appréhender pour des étudiants de 1^{er} cycle.

Bernard Multon a insisté également sur la nécessité de donner à nos étudiants des bases solides en physique et en technologie de façon à mieux les armer pour leur future vie professionnelle. Concernant la technologie il a mis en garde l'auditoire, au vu de la polyvalence des connaissances nécessaires à la compréhension des systèmes traités lors de ces journées, contre le risque de dispersion de notre enseignement.

Christian Glaize a, quant à lui, structuré ses réflexions suivant quatre plans distincts :

- Du point de vue technique, on a noté le fort aspect systémique des applications proposées et notamment les études liées aux réseaux électriques autonomes. Christian Glaize souligne que cette tendance se retrouve également dans d'autres sujets porteurs tels que les énergies renouvelables ou encore le véhicule hybride.

- Du point de vue des étudiants, Christian Glaize a ré-insisté sur le côté stimulant des applications avioniques susceptibles de faire « rêver » les étudiants. Cependant, il a relativisé son propos en expliquant à l'auditoire qu'il fallait aussi tenir compte de l'effet « zapping ». Certains étudiants risquent fort de se lasser dès qu'ils verront que pour maîtriser ces systèmes, la difficile connaissance des bases est indispensable...

- Du point de vue des enseignants, ces journées constituent une mine d'informations susceptibles de les aider dans la pratique de leur exercice pédagogique. En effet, ils auront à leur disposition non seulement les articles du colloque mais également la plupart des supports des présentations orales, le tout recueilli dans un numéro spécial de la revue en ligne J3EA. Ces informations peuvent aussi être complétées par la médiathèque e-EEA du club qui met gratuitement à disposition des enseignants un très grand nombre de supports de cours sur des sujets très divers. Ainsi, existe en ligne une base de donnée évolutive et de

qualité dans laquelle chaque enseignant peut trouver les informations complémentaires qui lui manquent.

- Du point de vue de la discipline, le fort aspect système et les compétences des domaines connexes qu'il implique (énergétique, mécanique, thermique) présente un risque de perte d'identité déjà visible dans les appellations des nouveaux masters pour lesquels le terme d'électrotechnique tend à disparaître car considéré, à tort, comme non porteur.



Des applications qui font « rêver » nos étudiants

Une première réaction de la salle est venue de Frédérique Berthereau de la société THALES AES. Cette dernière confirme en rapportant son expérience pédagogique auprès d'étudiants de DESS, l'attrait de ces derniers pour la thématique de l'avion plus électrique.

Olivier Charles de l'IUT de Besançon revient sur la dimension systémique des applications avioniques. Il indique l'omniprésence de la simulation lors des études présentées et les risques de transposer cette approche à un enseignement de 1^{er} cycle. En effet, le recours trop fréquent à la simulation peut conduire les étudiants à une perte de réalité. Marie-Michèle Le Bihan approuve en rappelant la nécessité de maintenir un enseignement de travaux pratiques basés sur la manipulation de systèmes réels. Pascal Maussion de l'IUFM de Toulouse va dans le même sens en citant un de ses collègues toulousains, qui dit de la simulation qu'elle est « sensoriellement pauvre ». Il lance également un appel à l'élaboration de maquettes de travaux pratiques liées à l'aéronautique, devant permettre à des étudiants de BTS d'acquérir une bonne formation d'ensemblier dans ce domaine. Mario Martinez de la société THALES AES complète en rappelant que les techniciens formés sont, dès leur embauche, confrontés aux essais expérimentaux. Il est donc capital que l'enseignement pratique correspondant à ce niveau d'étude soit préservé.

Eric Monmasson revient sur l'aspect système si caractéristique à ce champ applicatif. Il rappelle qu'il ne s'agit pas bien sûr, de former des étudiants de niveau ingénieur qui soient capables, dès la fin de leur cursus, d'appréhender dans toutes leur subtilité de tels systèmes. Cette tâche revient à des cadres seniors aptes à diriger des projets techniques d'envergure. Plus modestement, ces journées peuvent permettre d'affiner une pratique pédagogique en introduisant des travaux dirigés et des travaux pratiques qui s'appuient sur des contraintes industrielles propres aux systèmes

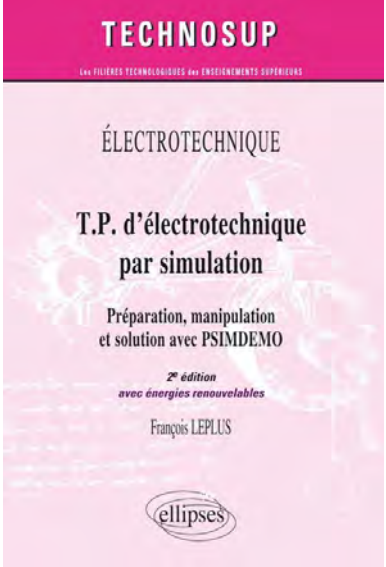
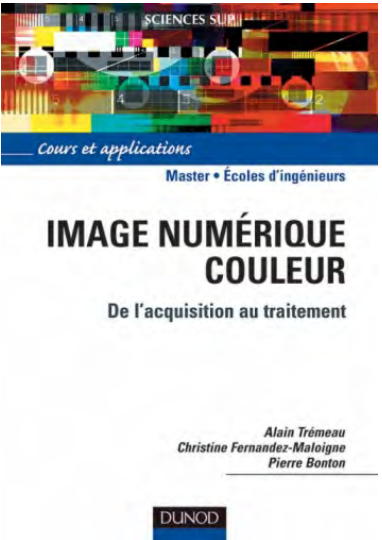
embarqués. En ce sens, ces journées fournissent un certain nombre de pistes. Eric Monmasson cite comme exemple de cette démarche pédagogique l'exposé de Nicolas Retière (voir plus haut).


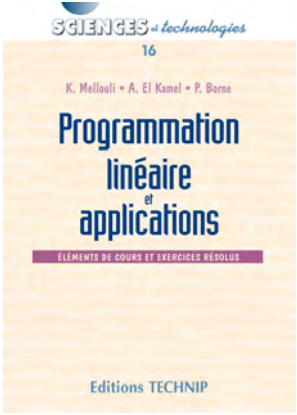
Bernard Multon va dans le même sens en soulignant la richesse de ces « contraintes » qui permettent de relier les fondamentaux académiques de la discipline à une réalité industrielle d'aujourd'hui. Régis Meuret confirme. Un cahier des charges bien posé peut conduire à une séquence pédagogique très formatrice pour les étudiants. Farid Meibody-Tabar explique qu'à l'ENSEM de Nancy ce type d'enseignement cadré par un cahier des charges industriel existe déjà sous la forme d'un projet de commande de machine. Il apparaît donc, qu'un enseignement de niveau master, de type projet pluridisciplinaire issu d'un cahier des charges industriel, courant sur plusieurs séances, soit une bonne solution. En effet, durant ce type d'étude forcément progressive, l'étudiant est d'abord confronté à un travail analytique, puis à une validation par simulation et enfin à une vérification expérimentale. La contrepartie est qu'un tel enseignement ne peut se concevoir qu'en fin de cursus.

Christian Glaize a conclu cette table ronde en rappelant que les applications avioniques sont porteuses d'une image positive de l'électrotechnique. Quant aux aspects systémiques qui se sont inmanquablement révélés lors de ces journées (un réseau de bord d'avion et les charges qui lui sont associées représente un monde en soi ou chaque élément influe sur les autres) et les outils d'analyse qui leur sont associés (simulation), ils doivent être appréhendés de façon raisonnée selon le niveau auxquels ces enseignements sont dispensés et selon leur finalité.

Ce compte-rendu est aussi pour nous l'occasion d'adresser un certain nombre de remerciements. Tout d'abord, nous tenons à remercier tous les intervenants qui par leur effort de pédagogie ont rendu ces journées instructives et vivantes. Par ailleurs, nous tenons également à remercier les collègues du Laboratoire SATIE et ceux de l'IUP GEII de l'UCP qui, de près ou de loin, ont été impliqués dans l'organisation de ces journées avec une mention spéciale à Dejan Vasic pour avoir d'une part réalisé et administré avec efficacité le site web de ces journées et d'autre part, assuré la réalisation pratique du CD-ROM. Enfin, nos plus vifs remerciements vont aux personnels administratif et technique de l'IUP GEII Isabelle Collet, Abasse Boukari et Arnaud Gustave pour leur très grande disponibilité et leur professionnalisme.

Les actes du colloque ont été publiés dans un CD-ROM (ISBN : 2-9521665-0-1) des exemplaires peuvent encore être acquis. Le prix ainsi que les modalités de vente seront prochainement disponibles sur notre site : http://www.u-cergy.fr/jeltek_eea_2004/. Par ailleurs, les articles ainsi que la plupart des supports des présentations orales seront repris dans un numéro spécial de la revue en ligne J3EA. Les personnes inscrites aux congrès bénéficieront d'un accès gratuit à ce numéro.

	<p>TP d'électrotechnique par simulation Énoncés et corrections avec PSIMDEMO <i>François LEPLUS, professeur agrégé de physique appliquée. Il enseigne en STS électrotechnique au lycée Lazare CARNOT d'ARRAS. Il est également titulaire d'un doctorat en électronique.</i> Éditions ELLIPSES, collection TECHNOSUP, 220 p</p> <p><i>Ce livre présente 20 manipulations dans les divers domaines de l'électrotechnique : électronique de puissance, machines électriques et automatique.</i></p> <p><i>Les solutions sont développées par simulation avec le logiciel PSIMDEMO.</i></p> <p><i>La simulation de travaux pratiques, désormais accessible à tous, permet de réaliser « chez soi » des manipulations d'électrotechnique. Cette approche des TP par simulation prépare les étudiants à la réalité du laboratoire d'essais :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - organisation du montage, - méthode de mesure, - mode opératoire, - réglage des paramètres. <p><i>Contenu :</i> Le logiciel de simulation PSIM - Puissances et diagrammes de Fresnel en sinusoïdal - Puissances en non sinusoïdal. Gradateur monophasé - Prédétermination des caractéristiques d'un transformateur monophasé - Prédétermination des caractéristiques d'une machine à courant continu - Moteur asynchrone. Caractéristiques. Méthode des pertes séparées - Machine asynchrone. Schéma équivalent - Redressement non commandé. Montage PD3 à diodes - Montage PD2 tout thyristor. Filtre d'harmoniques - Comparaison de deux montages redresseurs - Association transformateur triphasé - redresseur - Hacheur série - Hacheur réversible en courant - Onduleur monophasé en pont - Onduleurs monophasés à commande MLI - Onduleur triphasé. Commande pleine onde. Commande MLI - Moteur asynchrone à fréquence variable - Systèmes bouclés. Principe. Facteur de régulation - Identification des paramètres d'une machine à courant continu - Correction d'un système asservi. Correcteurs P et PI - Asservissement de vitesse. Structure cascade.</p>
	<p>Image numérique couleur, de l'acquisition au traitement <i>Alain TRÉMEAU, professeur à l'université Jean MONET DE Saint-Étienne, Christine FERNANDEZ-MALOIGNE, professeur à l'université de Poitiers, Pierre BONTON, professeur à l'université Blaise Pascal, à Clermont-Ferrand.</i> Éditions DUNOD, Sciences Sup., 460 p., 49 € TTC.</p> <p><i>La réalité des couleurs n'est pas une réalité objective, elle est subjective. Cependant, pour traiter et analyser des images numériques couleur, il est nécessaire de les coder et de définir des espaces colorimétriques.</i></p> <p><i>Cet ouvrage, après un historique sur la lumière et l'optique, aborde la notion de sensation des couleurs et les limites de cette perception. Le concept de chaîne d'acquisition et le choix du capteur sont présentés plus particulièrement. Plusieurs chapitres sont ensuite consacrés à la chaîne de traitement des images couleur. Les pré traitements (filtrage, restauration), la segmentation (contour, région, texture), l'analyse (attributs, indexation, reconnaissance des formes) et le codage constituent la base scientifique et technique pour comprendre et réaliser parfaitement cette chaîne. Plusieurs applications industrielles sont décrites en fin d'ouvrage afin d'illustrer au mieux l'intérêt des traitements précédemment développés.</i></p> <p><i>Cet ouvrage, coordonné par Alain Trémeau, Christine Fernandez-Maloigne et Pierre Bonton, a été rédigé par une équipe de spécialistes des universités de Cergy, de Clermont-Ferrand, de Dijon, de Grenoble, de la Rochelle, de Liège, de Lille, de Lyon, de Poitiers, de Rouen, de Saint-Étienne, d'Annecy, de l'école des mines d'Alès, de l'ENSEA et du CEMGREF de Rennes.</i></p> <p><i>Il est destiné aux étudiants des MASTERS, des écoles d'ingénieurs et des doctorats orientés vers le domaine du traitement des images couleur. Il intéressera également les ingénieurs et chercheurs confrontés à un problème lié à la mesure, au traitement et à l'analyse de l'information couleur.</i></p>

	<p>Le Radar, 1904-2004 Histoire d'un siècle d'innovations techniques et opérationnelles. Yves BLANCHARD, Ancien Ingénieur de Recherche à l'ONERA et Directeur Technique à Thales Systèmes Aéroportés, Ingénieur Conseil. THALES, Éditions ELLIPSES, 428 p.</p> <p><i>Le RADAR, véritable « sixième sens » de l'homme moderne, compte parmi les trois ou quatre inventions qui ont le plus marqué l'Histoire des Techniques au XX^{ème} siècle. Son impact, évident sur le déroulement des grands conflits et sur l'évolution de la stratégie militaire, s'exerce aussi sur de nombreux secteurs civils tels que les transports maritimes ou aériens, la conquête spatiale, et plus simplement sur notre sécurité quotidienne.</i></p> <p><i>Cet ouvrage arrive à point nommé pour clarifier une histoire dont on célèbre bientôt le centenaire : le Telemobiloskop, premier ancêtre du Radar, a été expérimenté par C. Hülsmeier en Allemagne le 8 mai 1904 ! ses suites n'ont pas connu de frontières. On trouvera ici pour la première fois une chronologie argumentée des contributions des différents pays, qui ne néglige évidemment pas la participation française.</i></p> <p><i>L'auteur s'est efforcé de dépasser la barrière technique, en se concentrant sur les ruptures technologiques essentielles, et en situant les facteurs déclencheurs de ces innovations dans le contexte de l'histoire générale. En soulignant le rôle des inventeurs, en relation avec l'apparition des nouveaux besoins opérationnels et les progrès de la technologie, il réussit ainsi à mettre à la portée du plus grand nombre une histoire réputée jusqu'ici complexe.</i></p> <p><i>La lecture est éclairée par de nombreuses anecdotes, souvent inédites : elles illustrent la place prépondérante que cette invention a tenue dans notre histoire contemporaine. Pour une utilisation pratique pour les étudiants ou les chercheurs, l'ouvrage est complété par divers outils tels qu'un index de près de 500 noms et 250 références de matériels, et un tableau chronologique très complet qui situe clairement les contributions de chacun dans le processus de l'innovation.</i></p>
	<p>Programmation linéaire et applications, Éléments de cours et exercices résolus. K. MELLOULI, A. EL KAMEL, P. BORNE. Éditions TECHNIP, Sciences et technologies, 128 p., 26 € TTC.</p> <p><i>Cet ouvrage propose une approche simple et systématique de la programmation linéaire, dont le but est l'optimisation d'un critère linéaire par rapport aux paramètres du problème étudié en présence de contraintes linéaires.</i></p> <p><i>Présentée de manière simple et explicite, la méthode utilisée est illustrée par de nombreux exemples de mise en œuvre, intéressants particulièrement les domaines liés à l'allocation et à l'optimisation des ressources concernant la finance, l'économie et la production.</i></p> <p><i>Le cas de la programmation linéaire pour des problèmes mélangeant les variables réelles, entières et/ou booléennes est également envisagé.</i></p> <p><i>Cet ouvrage s'adresse aux étudiants de l'enseignement supérieur, premier et second cycle, concernés par les problèmes d'optimisation, en particulier pour l'allocation de ressources.</i></p>

La Revue 3EI et l'énergie.

Michel MEUNIER

MMEC (Michel Meunier Énergie Conseil)
8, Avenue de la Belle Gabrielle
91 390 MORSANG SUR ORGE
micmeunier@aol.com



Votre revue vous propose une série de numéros sur l'énergie électrique :

- *La problématique de l'énergie : la place de l'électricité* (36, mars 2004) ;
- *Les grands outils de production de l'énergie électrique* (37, juin 2004) ;
- *Production décentralisée de l'électricité* (38, décembre 2004) ;
- *Le transport de l'électricité, la gestion du réseau* (40, juin 2005 ...)

Moins médiatisée que l'informatique ou les télécommunications, l'énergie est un acteur majeur du 21^{ème} siècle : sans énergie, il n'y a plus d'informatique, plus de téléphone mais aussi plus de production industrielle, et surtout, plus de lumière. Bref, plus grand chose...

Mais cette énergie vitale est aussi associée, dans une angoisse aujourd'hui très répandue, au risque de destruction de notre monde. Des pollutions diverses jusqu'à l'incertitude sur l'évolution du climat de la planète, l'énergie représente la part majeure du souci écologique. Aujourd'hui, l'écologie ne peut plus être absente et influence les décisions politiques dans tous les pays du monde.

Cette situation est très favorable au développement de polémiques et de disputes que le genre humain est particulièrement apte à fabriquer. Nous n'avons pas à entrer dans ces polémiques, nous devons rester factuels : quelles sont les techniques, quels sont les problèmes, quelles sont les solutions, quels sont les bilans.

Au sein du problème énergétique, l'énergie électrique a une place à part.

Elle est propre : elle alimente largement nos maisons, sans les salir. Mais sa production suscite bien des inquiétudes : épuisement des combustibles fossiles, intérêt et risques du nucléaire, engouement pour les « énergies renouvelables »...

Comment structurer cette série de numéros ? Comment vous permettre de trouver dans cette série des informations utiles, les chiffres importants indiqués clairement et sans ambiguïté ? Comment vous donner des liens entre votre enseignement quotidien qui est relatif, de près ou de loin, à l'énergie électrique et les grands problèmes de notre temps, les enjeux pour le futur ? Comment pouvoir dire à nos élèves que, en suivant l'enseignement de l'électrotechnique en général, ils sont en train de se construire pour être les acteurs décisionnaires du monde à venir ?

Une infinité de choix se présente. Une décision est prise ; c'est, bien sûr, celle qui nous a semblé la meilleure.

Nous commencerons par la problématique générale : les besoins et l'offre ; qu'allons nous consommer, quels sont les stocks disponibles, les techniques, quels sont les grands enjeux ? Comment allons nous faire pour passer d'un système où l'énergie est disponible partout et à tout moment, à un système où l'énergie est coûteuse, où l'économie est nécessaire ? Dans le même temps, un bilan sera fait sur l'évolution du climat ; c'est un domaine où tout est dit ainsi que son contraire ; nous montrerons l'état, les difficultés scientifiques, les doutes et les certitudes.

Après cette approche globale, nous verrons les grands moyens de production de l'énergie électrique. C'est la situation actuelle ; de gigantesques centrales de production nucléaires, thermiques à flamme ou hydrauliques fournissent de l'énergie dans un système dont nous pensions, il y a 50 ans, qu'il nous conduirait

à l'abondance. Nous héritons et nous profitons de ce système optimiste. Nous y verrons « l'archaï sme » du système où nous sommes contraints de passer d'une énergie calorifique à une énergie mécanique (avec la pénalité du cycle de Carnot) puis, enfin, à une énergie électrique ; le tout se fait avec un rendement bien modeste et, donc, un gaspillage d'énergie important. Mais, à chaque étape, des trésors d'ingéniosité ont été utilisés ; nous ne savons pas faire mieux.

La production décentralisée est plus à la mode. Ce sera le troisième point. Elle est plus écologique en ce sens qu'elle permet assez efficacement des techniques de cogénération et qu'elle minimise le transport, toujours coûteux ; elle permet aussi de mettre en oeuvre l'utilisation d'énergies renouvelables. Plutôt mal acceptée (dans les faits plus que dans les discours !) par les grands opérateurs du système précédent, elle bénéficie dans de nombreux pays d'une incitation forte créée par les politiques. Elle se développe autour de niches de profit soit naturelles (ce qui est certainement le mieux), soit artificielles à travers une réglementation favorable inspirée par des décisions politico-écologiques. Espoir du monde futur ou agitation inutile suivant les options de raisonnement prises et la couleur politique de celui qui tente de réfléchir, nous n'avons pas à prendre position : nous montrerons les techniques et leurs problèmes, des exemples de réalisation.

Enfin, tous les partenaires de cet ensemble destiné à procurer l'énergie et le confort sont reliés entre eux par le réseau. Opérateur spécialisé de transport de l'énergie électrique, il est le lien entre producteurs et clients. Initialement développé pour améliorer la qualité de service en permettant le secours d'un producteur en panne, il est devenu gigantesque. Il couvre tout le continent et même au-delà ; il est le siège d'échanges commerciaux considérables. C'est le

plus grand système régulé que l'homme ait osé construire. Il a un fonctionnement délicat et quelques défaillances très largement médiatisées (ainsi que considérablement coûteuses !). Il n'est pas bien discret : les lignes électriques sont solidement implantées dans nos paysages, tout autant que les routes et les voitures. Curieusement, ses difficultés de fonctionnement ne sont pas seulement techniques. Elles sont aussi économiques. Chaque pays ou chaque zone a défini des règles différentes de fonctionnement du marché de l'énergie électrique et il n'y a pas un marché dont on puisse dire qu'il fonctionne mieux que tous les autres. Chaque marché, d'ailleurs fonctionne sans qu'on sache de façon exhaustive quelles sont les conséquences des règles de fonctionnement imposées.

Là encore, la complexité technique et économique conduit à l'incertitude et à la polémique. Mais cela n'empêche pas d'avancer : le réseau est là, les producteurs produisent, les utilisateurs consomment, le système fonctionne.

En suivant cette série de numéros, vous ne saurez pas tout sur le système qui nous donne accès à l'énergie électrique. Plein de choses resteront à dire. Mais, bien sûr, d'autres thèmes sont intéressants et d'autres séries de numéros seront organisées.

Celui-ci me paraît très important. Traditionnellement, l'électrotechnique et le domaine de l'énergie électrique (c'est la même chose !) n'attirent pas beaucoup les étudiants. Mais l'énergie entre au coeur de notre société ; elle suscite des débats passionnés. Il faut dire à nos élèves d'électrotechnique qu'ils n'apprennent pas la science de leurs grands-parents mais qu'ils plongent au coeur de la nouveauté et que leurs connaissances influenceront directement le devenir de notre société.

La demande mondiale d'énergie sur le long terme

Marie Hélène LAURENT, Gwennael SALAUN
Département éco-efficacité et procédés industriels
Groupe prospective énergétique et appui stratégique
Avenue des Renardières - Ecuelles BP 46
F-77 818 MORET sur LOING
Fax 33 01 60 73 75 27

Résumé : La demande d'énergie analysée dans ce document est la demande d'énergie finale (la quantité d'énergie livrée chez le consommateur final, énergie traditionnelle incluse¹). Les autres aspects, tels que l'énergie primaire, la conversion et la distribution de l'énergie dépendent davantage de l'offre d'énergie, c'est-à-dire des moyens pour satisfaire les besoins du consommateur final.

I Pourquoi consomme-t-on de l'énergie ?

Les déterminants de la demande énergétique

L'énergie est nécessaire pour se nourrir, se chauffer, se déplacer, pour produire les équipements et les services destinés à la satisfaction de nos besoins. Cette première partie tente d'éclairer sur les mécanismes complexes qui déterminent la demande d'énergie. Un fil conducteur reste présent tout au long de l'analyse : comment limiter la croissance de la demande d'énergie ?

II Les principaux déterminants de la demande

a) La population

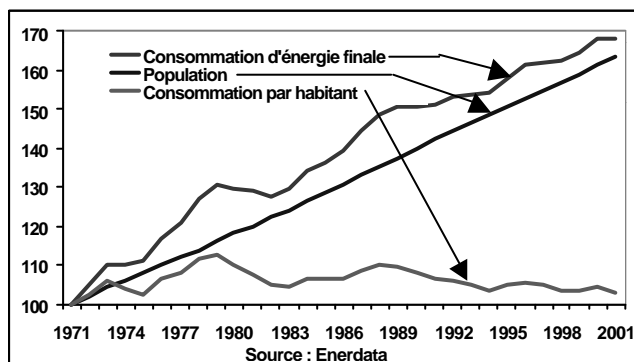


Figure 1 : Évolution de la population, de la consommation finale d'énergie et de la consommation finale d'énergie par habitant dans le monde (1971 = base 100) (source EDF à partir d'Enerdata).

Dans les **pays en développement**, où la croissance de la population est rapide et la demande d'énergie finale par habitant augmente modérément (hausse de 40% de la demande d'énergie finale par habitant des pays en développement entre 1971 et 2001 et de 150% de la demande d'énergie totale), **l'augmentation du nombre d'habitants est le facteur principal déterminant l'évolution de la quantité d'énergie**

consommée. Le lien entre accroissement de la population et de la quantité d'énergie consommée dans les pays industrialisés aurait été tout aussi prépondérant par le passé (impossible à vérifier en l'absence des séries historiques de long terme), il tend néanmoins à devenir mineur.

L'évolution de la structure de la population (c'est à dire la pyramide des âges, la répartition ville/campagne, la composition des ménages) joue aussi un rôle déterminant dans les pays industrialisés (et jouera certainement demain un rôle dans les pays en développement). Mais, les conséquences quantitatives sur la demande d'énergie de certaines modifications de la structure de la population, comme le vieillissement de la population, sont encore très difficiles à apprécier.

b) Le développement économique

L'observation des données permet de tirer quelques enseignements empiriques sur le lien entre la demande finale d'énergie et le développement économique :

➤ Globalement, **la demande d'énergie mondiale croît avec le PIB**.

➤ Mais en y regardant de plus près, **la demande d'énergie croît moins rapidement que l'économie** : il y a un découplage entre croissance de la demande d'énergie et croissance du PIB. Selon les régions et les pays, le découplage est plus ou moins accentué. Plus le développement économique est avancé, plus le découplage est important (il y a un découplage faible en Afrique). Il existe aussi des pays où la demande d'énergie finale est totalement décorrélée du PIB, au Danemark et en Suède depuis 1970 par exemple.

➤ Une **analyse par usage** montre que l'origine du découplage observé depuis quelques décennies vient des **usages stationnaires thermiques**, qui suivent une évolution très décorrélée du PIB. En revanche, la demande d'énergie pour la mobilité suit de très près

¹ Énergie non commerciale : bois de feu, déchets végétaux, animaux, etc. (34% de la consommation finale d'énergie des pays en développement en 2000)

celle du PIB, et celle pour l'électricité croît au même rythme ou plus vite que l'économie.

➤ Un indicateur mesure le couplage entre l'économie et la demande d'énergie : **l'intensité énergétique** (consommation d'énergie par unité de PIB).

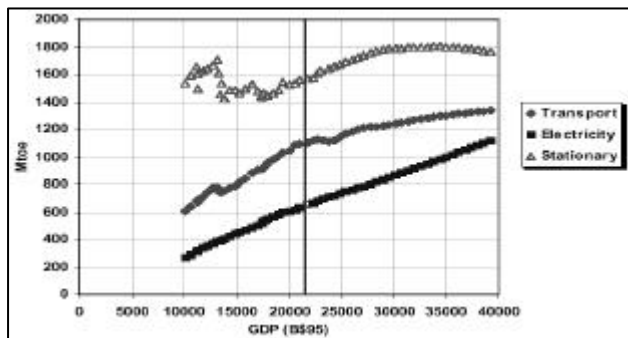


Figure 2 : Demande d'énergie pour les usages stationnaires thermiques, électriques et de mobilité. (source : Poles - P. Criqui - LEPII/EPE)

L'intensité énergétique primaire² a baissé de 1% par an depuis 1800 dans les quelques pays observés (États-Unis, France, Grande-Bretagne, etc.) (énergies commerciales incluses). Néanmoins, cette tendance globale cache une évolution accidentée avec des périodes de stagnation, de dégradation et d'amélioration rapide de l'intensité énergétique (exemple : en France, l'intensité énergétique finale et primaire ont baissé respectivement de 2.1% et 1% par an entre 1973 à 1990, et de 0.7% et 0.2% par an entre 1990 et 2000).

➤ **La baisse tendancielle de l'intensité énergétique finale trouve son origine** dans la dynamique économique : progrès technologiques et amélioration de l'efficacité des systèmes énergétiques, taux de renouvellement des équipements, substitution entre les énergies (différentes transitions énergétiques), évolution de la structure économique (part des industries énergivores, du tertiaire, etc.), etc. A l'inverse, l'apparition de nouveaux besoins (exemple : climatisation) peut atténuer cette baisse de l'intensité énergétique (ce n'est pas obligatoire : si le développement d'un nouveau besoin a pour effet d'accroître la richesse, alors le rythme de décroissance de l'intensité énergétique ne sera pas ralenti).

➤ **L'intensité énergétique diminue d'autant plus rapidement que le développement économique est tardif**, car il y a un transfert, plus ou moins important, des pratiques et des technologies efficaces en

provenance des pays les plus avancés. La question des transferts est cruciale et mériterait d'être traitée.

➤ Néanmoins, à l'intérieur d'un échantillon de pays, **ce ne sont pas forcément les pays les plus développés, qui ont l'intensité énergétique la plus faible**. En effet, le développement économique n'est qu'un déterminant parmi d'autres de l'intensité énergétique, comme nous allons le voir.

➤ Le développement économique modifie la **répartition sectorielle de la consommation d'énergie** : consommation concentrée sur le résidentiel aux premiers stades du développement économique, ensuite hausse de la part de l'industrie, et enfin, à des stades avancés de développement, accroissement de la part des transports et retour du résidentiel³. En parallèle, **le mix énergétique** se modifie : d'une consommation basée sur des énergies traditionnelles (biomasse) à une consommation basée sur des énergies modernes (pétrole, électricité, etc.).

Conclusions : l'intensité énergétique est un indicateur synthétique qui regroupe les aspects « développement économique » présentés ci-dessus, mais qui reflète aussi les caractéristiques des déterminants présentés ci-dessous dans les différents pays (prix de l'énergie, climat, infrastructure, comportement, etc.). L'enjeu de la maîtrise de la demande est d'infléchir la tendance naturelle de l'évolution de l'intensité énergétique.

c) Les prix de l'énergie

L'impact du prix de l'énergie finale (taxes incluses) sur la demande d'énergie est complexe.

➤ **impact important d'un choc de prix**, comme les chocs pétroliers de 1973 et 1979. Nos connaissances se limitent pour le moment aux pays industrialisés, où le secteur industriel fut très réactif : en réponse à la hausse des prix, il a amélioré l'efficacité énergétique de ses procédés. Le chauffage des bâtiments fut aussi touché par les chocs pétroliers (réglementations thermiques). L'impact sur les autres secteurs fut, semble-t-il, beaucoup plus faible. Dans quelques pays, l'épais matelas de taxes sur les prix finaux dans le secteur des transports a amorti l'ampleur du choc.

➤ une **comparaison entre différents pays** montre que l'intensité énergétique est plus élevée quand le prix de l'énergie est bas (Etats-Unis, Australie). Néanmoins, cette corrélation est très **fragile** : pour des prix de l'électricité comparables, l'intensité électrique en 1998

³ Les explications sont multiples et complexes : Quelques pistes :

- 1 - évolutions des besoins au cours du développement économique (mobilité),
- 2 - évolution de la structure économique (accroissement des activités tertiaires),
- 3 - pour l'industrie dans les pays industrialisés, une amélioration de l'efficacité énergétique, des délocalisations vers les pays moins développés, etc.

du Canada est deux fois plus élevée que celle du Royaume-Uni (source : « Energy efficiency policies and indicators » du CME). Le prix, s'il en est, n'est qu'un facteur influent parmi d'autres.

➤ à l'exception du secteur industriel, il est difficile de comprendre le **comportement** des consommateurs face à une hausse des prix finaux (taxes incluses). Pour le secteur résidentiel, historiquement, et depuis fort longtemps, les habitants auraient tendance à consacrer une part constante de leur budget alloué à ce poste⁴.

Les mesures sur les prix (taxation, etc.) sont des leviers potentiels pour infléchir les tendances de la consommation d'énergie. La compréhension de l'impact des prix sur les comportements est donc essentielle.

d) La nature des lieux de vie

➤ **Dans les pays en développement**, la consommation d'énergie par habitant est plus élevée dans les zones urbaines que dans les zones rurales. Ce phénomène s'explique par des **différences de niveaux de vie entre les villes et les campagnes**. L'écart de consommation n'est donc pas lié à la nature du lieu de vie, mais à une différence de développement économique. L'urbanisation joue toutefois un rôle dans la composition du mix énergétique, l'accès aux énergies commerciales étant plus aisé et l'accès aux énergies traditionnelles plus difficile dans les villes.

➤ En revanche, l'impact du lieu de vie sur la consommation est plus visible dans les pays industrialisés, où les différences de revenu entre les populations rurales et urbaines sont minimales : la consommation d'énergie est plus élevée dans les zones rurales (part des maisons individuelles plus élevée, besoins de transport, notamment individuel, plus élevés, etc.).

e) Le climat et la géographie

Le contexte géographique influence la demande d'énergie :

➤ **le climat** : les différences de températures conditionnent la consommation d'énergie liée au confort thermique (chauffage, climatisation) et à l'éclairage des bâtiments. Néanmoins, la demande d'énergie pour ces usages est aussi très liée à la qualité d'isolation des bâtiments, au type d'habitat (individuel/collectif) et à l'efficacité des technologies employées. Ainsi, la consommation unitaire (par mètre carré) de la Finlande est 1.7 fois plus élevée que celle des autres pays scandinaves en dépit d'un climat proche.

➤ **les ressources disponibles** : dans un contexte d'abondance des ressources énergétiques, la contrainte est faible et les comportements sont énergivores (Russie, Chine, États-Unis), alors que dans un contexte

de forte dépendance énergétique, la rationalisation de la consommation d'énergie est recherchée (Japon).

➤ **la taille du pays et à la répartition de la population** : la consommation d'énergie pour la mobilité est très importante dans les grands pays (États-Unis, Australie), mais d'autres facteurs expliquent les modes de consommation de ces pays (prix, etc.).

f) Les infrastructures

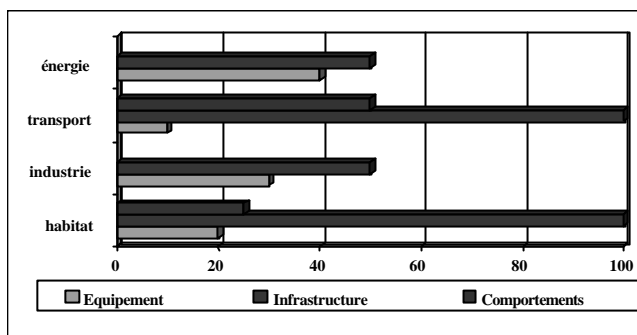


Figure 3 : Prise en compte des temporalités – abscisse en années (VLEEM – B. Château – Enerdata)

Les infrastructures ont un impact très fort et de longue durée sur les consommations d'énergie :

➤ L'aménagement du territoire

Les choix en matière d'urbanisme conditionnent la demande d'énergie :

- ville concentrée (Japon)/ étalée (États-Unis) et structure du transport (part du transport collectif, individuel) influencent les besoins en transport ;
- le type d'habitat (individuel/collectif) conditionne les consommations de chauffage

Les actions portant sur l'aménagement du territoire sont nécessaires pour contrôler l'évolution de la demande d'énergie. Mais en urbanisme, **les constantes de temps sont de l'ordre du siècle et les tendances très lentes à inverser**.

Dans les pays industrialisés, où les infrastructures sont mûres, inverser la tendance sera long. **Les décisions d'inflexion doivent par conséquent être prises dès aujourd'hui.**

Pour les pays en développement, où les inerties liées aux infrastructures sont encore très faibles, les choix d'urbanisme et d'aménagement du territoire constituent probablement **le levier le plus important pour orienter la demande future des PED**. Compte tenu des progrès rapides de l'urbanisation, **les choix faits aujourd'hui seront déterminants** pour la consommation énergétique de ces pays, et donc du monde vu leur part grandissante, pour le siècle à venir.

⁴ source : Enerdata

➤ Les bâtiments

Les bâtiments (orientation, taille, isolation) font partie des infrastructures qui ont un impact fort sur la demande d'énergie, plus précisément sur la climatisation et le chauffage (le chauffage représente en 2000 18% de la consommation d'énergie totale en Europe).

Dans les pays industrialisés, des progrès importants ont été réalisés dans l'efficacité thermique des bâtiments : il existe un facteur de presque 2 entre la moyenne des consommations de chauffage des bâtiments européens et ceux construits il y a moins de 10 ans. Les gisements d'économies restent importants. Toutefois, les gisements dans les bâtiments neufs sont de plus en plus difficiles à exploiter avec le temps : hors politique particulière, le potentiel que représente les bâtiments neufs est limité par des vitesses de renouvellement faibles des parcs (inférieur à 1% par an). **Les solutions passeront donc nécessairement par la rénovation de l'existant.** Des politiques volontaristes de rénovation de l'ancien seront indispensables, comme cela s'est fait au Danemark et en Norvège, pour s'affranchir des barrières (exemples : coût d'investissement élevé des rénovations, opacité de l'offre de la filière du bâtiment).

A l'image des choix d'urbanisme (mais dans une moindre mesure), **pour les pays en développement**, les marges de manœuvre sont importantes, et **les choix de la performance des bâtiments neufs impacteront fortement la consommation d'énergie future.**

g) Les équipements

La durée de vie des équipements (électroménager, chaudières, véhicules, procédés industriels, etc.) est moins importante que celle des infrastructures, néanmoins, à l'exception de l'électroménager, elle est toujours supérieure à 10 ans.

Dans les pays industrialisés, à l'image des bâtiments, l'efficacité énergétique des équipements n'a cessé de s'améliorer. Pourtant, l'offre représentative du marché est toujours en deçà de l'efficacité de la meilleure technologie disponible. **Des gisements d'économies d'énergie importants restent par conséquent à exploiter.** Mais, les gains réalisés sur l'efficacité des équipements sont fortement limités (à l'exception du secteur industriel) par **l'augmentation des taux d'équipements des ménages, par la multiplication des ménages, l'apparition de nouveaux besoins, par des effets de comportements** (« acheter plus gros »).

Pour les pays en développement, la consommation va être fortement conditionnée par l'ampleur des **transferts des technologies efficaces** en provenance des pays industrialisés et des **moyens de production d'équipements efficaces sur place**, ainsi que par le **modèle de développement de pays riches qu'ils aspireront à imiter.**

h) Les comportements

➤ De tous les facteurs influençant la demande d'énergie, le comportement est **le plus complexe**, et surtout **le moins bien connu**. Les critères économiques sont insuffisants pour comprendre les choix de consommation d'énergie (exemple : le comportement d'achat dans le résidentiel est lié au coût d'investissement et peu au coût de fonctionnement réel).

➤ On entend souvent que les gisements d'économies d'énergie liés à des modifications du comportement sont importants (concernant le chauffage, 1°C en moins équivaut à 7% d'économies), néanmoins il n'existe aucune étude sur le sujet. Les politiques visant à exploiter ces gisements sont souvent confrontées à de fortes rigidités : le consommateur tend à adapter son comportement de façon à garder la part de son budget allouée à l'énergie relativement constante (exemple : augmentation de la température de chauffage après des travaux de rénovation). Par conséquent, **les politiques destinées à économiser de l'énergie devront toujours prendre en compte l'aspect comportemental.**

➤ les comportements des habitants des pays en développement vont-ils converger avec ceux des pays industrialisés ? Si oui, suivront-ils un modèle européen ou japonais, ou un modèle nord-américain ?

III Les politiques

La demande d'énergie suit une évolution naturelle, qui diffère entre les régions selon les caractéristiques prises par les différents déterminants de la demande.

Le potentiel d'économies d'énergie est, selon les experts, important, et il est, pour une partie, économiquement rentable de l'exploiter. Pourtant de nombreuses barrières empêchent la réalisation du potentiel, malgré l'intérêt purement économique qu'il représente (manque d'informations, etc.). Infléchir les tendances actuelles de progression de la demande d'énergie nécessite la mise en place de politiques.

Les politiques de maîtrise de la demande peuvent prendre différentes formes : mécanismes de marché, réglementations, fiscalité, subventions, information, accords volontaires, etc.. Elles doivent être coordonnées à des politiques qui ne concernent pas directement le secteur énergétique, comme les politiques d'aménagement du territoire, du logement, etc. Pour les pays en développement, il faut ajouter l'appropriation de technologies efficaces adaptées au contexte local (moyens de production, etc.).

Exemples de politiques instaurées dans les pays industrialisés :

➤ pour le renouvellement des **équipements**, les réglementations sur les performances minimales de l'électroménager accélèrent la baisse de l'intensité

énergétique associée, mais les comportements limitent les effets de ces mesures.

➤ les politiques de prix, de fiscalité ont une influence sur le **comportement** d'achat et d'investissement des consommateurs.

Mais la plupart des études montrent que les efforts d'économie à réaliser demanderont des politiques plus volontaristes que la simple prolongation des politiques actuelles.

Aucun des facteurs que nous avons décrits ne suffit à lui seul pour réaliser l'effort de maîtrise de demande en énergie qu'il sera nécessaire d'accomplir au cours du prochain demi siècle. Des mesures concernant tous les facteurs influençables sont donc nécessaires.

IV Prospective de la demande d'énergie Mondiale

Les prochaines décennies seront caractérisées par l'aggravation des tensions associées au secteur de l'énergie :

- La première est la raréfaction et la cartellisation des réserves d'hydrocarbures.

Le pic de production du pétrole est situé entre 2010 et 2030 selon les sources et du gaz 10 à 20 ans plus tard. De surcroît, les réserves restantes seront de plus en plus concentrées dans certaines régions du globe et de plus en plus coûteuses à exploiter. Ces tensions pourraient remettre en cause l'approvisionnement énergétique et conduire à une forte hausse du prix des hydrocarbures.

- La deuxième est la lutte contre le changement climatique, associé aux émissions massives de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère. Les combustibles fossiles sont aujourd'hui responsables d'environ 2/3 des émissions de GES. Le secteur de l'énergie est par conséquent très concerné par la problématique du changement climatique. Pour arrêter de perturber l'équilibre climatique, il faudrait stabiliser la concentration de GES dans l'atmosphère, et limiter nos émissions annuelles à 3 GtéquivalentCarbone (la niveau actuel d'émissions est à environ 7 GtéquivalentC). L'enjeu est considérable.

Une croissance forte des besoins mondiaux en énergie dans les prochaines décennies pourrait conduire à une forte aggravation de ces tensions. Quelles sont les projections de la demande d'énergie à moyen et long terme ?

V Les déterminants de la demande finale dans les études prospectives mondiales à moyen-long terme

Idéalement les études prospectives sur la demande devraient analyser l'évolution de l'ensemble des déterminants de la demande finale d'énergie pour construire des images de la demande d'énergie future. Mais le caractère macroscopique des études prospectives mondiales et l'insuffisance des

informations disponibles (les données par usage par exemple) contraignent à simplifier la démarche. Ainsi la demande d'énergie se structure autour de trois variables : la population, le développement économique et l'intensité énergétique (indicateur qui agrège une bonne partie des déterminants de la demande).

Les trois variables sont parfois très corrélées : le développement démographique avec le développement économique et surtout la diminution de l'intensité énergétique avec le développement économique (« toutes choses égales par ailleurs, plus le développement économique est rapide, plus la diminution de l'intensité énergétique est importante »).

Les politiques de maîtrise de la demande d'énergie influent sur la demande via la baisse de l'intensité énergétique.

VI Les besoins énergétiques mondiaux en 2030 selon l'AIE

L'AIE a construit un scénario de référence basé sur un jeu d'hypothèses sur l'environnement macro-économique, la croissance démographique, les prix de l'énergie, les politiques gouvernementales et la technologie. **Il n'intègre que les politiques et mesures en vigueur ou annoncées mi-2002.** Ce scénario a été choisi comme référence, mais ne peut être considéré comme tendanciel car, sur le plan politique, c'est une image figée de la situation actuelle (ce pourrait être une image du futur si les contextes politiques et institutionnels actuels étaient figés, ce qui n'est pas le cas).

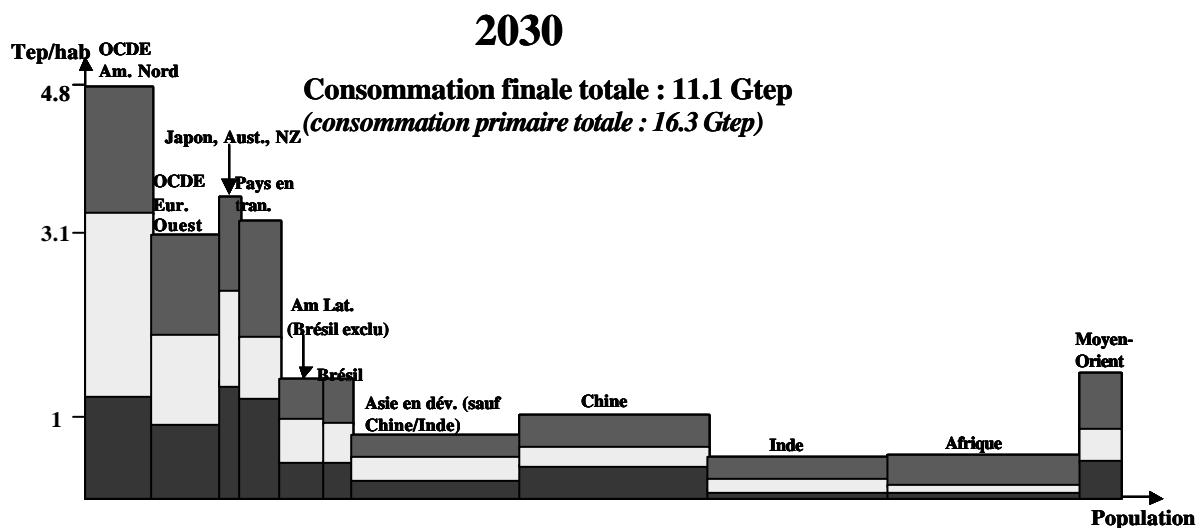
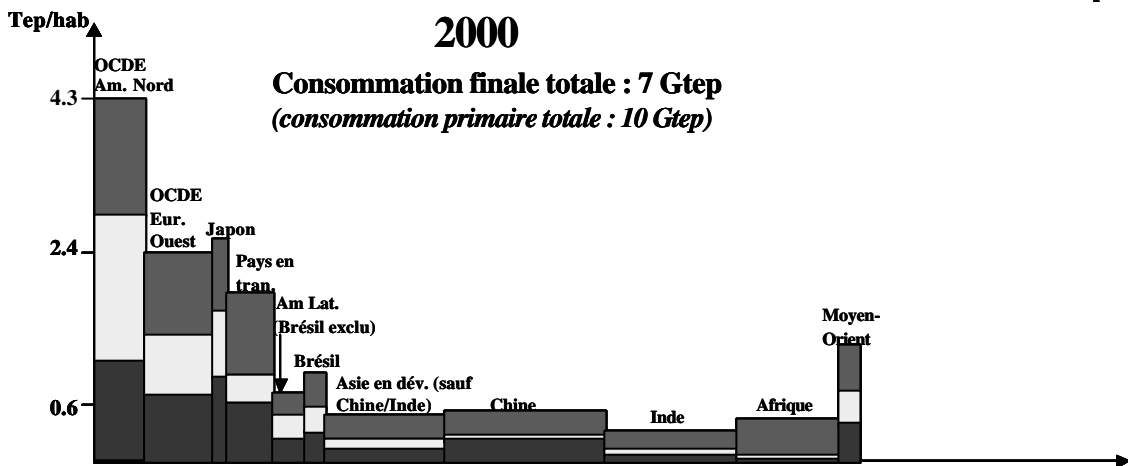
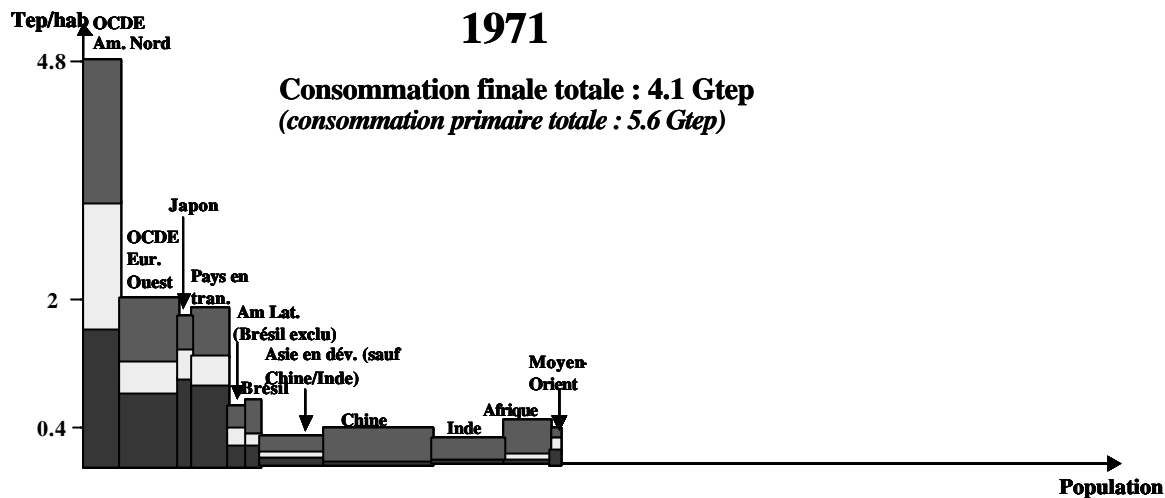
Les fait marquants :

➤ Le scénario projette un quasi-doublement de la consommation finale d'énergie : de **6.8 Gtep en 2000 à 11 Gtep en 2030.**

➤ **L'accroissement mondial de la demande finale d'énergie se situe pour une grande part dans les pays en développement (60%), et surtout dans l'Asie en développement.** La Chine et l'Inde deviennent des acteurs majeurs, ils contribuent à 24% de l'augmentation de consommation d'ici à 2030. Les zones urbaines absorberont une grande partie de la hausse.

L'accroissement de la demande d'énergie dans les pays en développement touche essentiellement les villes moyennes :

Une étude des Nations-Unies (World Energy Prospect 2001) estime que 40% de l'accroissement mondial de la population d'ici 2015 se situera dans les villes de moins de 500 000 habitants et 25% dans les villes de 1 à 5 millions d'habitants. Seulement 4.7% de la population mondiale habitera dans des mégapoles (villes de plus de 10 millions d'habitants).



Industrie
 Transport
 Résidentiel/tertiaire/agriculture

Consommation d'énergie finale par habitant, par région et par secteur d'activité (source : EDF à partir d'Enerdata et AIE 2002)
 (Echelle identique pour les trois graphiques)

➤ **La demande d'énergie de l'OCDE**, bien qu'elle ait déjà atteint des seuils très élevés, **continue de croître** (1% par an). Un écart de seulement un point avec la croissance annuelle de la demande en Asie en développement (2.2% par an) !

➤ Malgré une hausse importante en valeur absolue de la demande d'énergie des pays en développement, de **fortes inégalités persistent** entre la consommation d'énergie par habitant en 2030 des pays industrialisés et des pays en développement (un facteur 5 entre la consommation finale par habitant de l'OCDE et de l'Asie en développement). En 2030, **1.4 milliards de personnes n'auront toujours pas accès à l'électricité** (contre 1.6 milliards aujourd'hui) et une proportion importante de la population des régions en développement aura **recours à la biomasse traditionnelle** pour les besoins quotidiens.

➤ Dans l'ensemble des régions, **le demande d'énergie des prochaines décennies sera tirée par le transport** (exemple : 50% de la hausse de la demande d'énergie par habitant de l'Asie en développement et de l'OCDE d'ici 2030), et immédiatement après par les usages captifs de l'électricité (à l'exception de l'OCDE la demande par habitant d'électricité double dans toutes les régions, et dans l'OCDE c'est la seule source d'énergie finale dont la part progresse).

➤ En conséquence, **les énergies liquides** (essentiellement le pétrole) **représentent la moitié de l'accroissement de la consommation d'énergie finale d'ici 2030** (dont 60% pour le transport) **et l'électricité presque un tiers** (28% exactement). La part de la consommation d'électricité dans le mix énergétique s'accroît dans la totalité des régions.

Des résultats sans grandes surprises, néanmoins quelques points à noter :

Sur les hypothèses :

➤ Les taux de croissance économique annoncés pour certaines régions, et notamment la Chine (4% par an pendant 30 ans) ne sont-ils pas trop optimistes ?

➤ Le taux de décroissance de l'intensité énergétique finale est plus faible comparé aux trois décennies précédentes (1970 à 2000) et même comparé aux années 90 dans l'OCDE et dans l'Asie en développement (les plus gros foyers de consommation d'énergie). Pourquoi l'AIE fait-elle l'hypothèse d'un ralentissement des tendances ? Les hypothèses de décroissance ne sont-elles pas trop pessimistes ?⁵

Sur les résultats :

➤ La consommation par habitant de l'Asie en développement augmente faiblement, (de 0.45 en 2000 à 0.7 tep par habitant en 2030), hausse en partie absorbée par les transports (50%), alors que le PIB par

habitant explose (multiplication par 3). La consommation par habitant des secteurs résidentiel, tertiaire, agriculture et industrie évolue très peu.

Quelques explications (insuffisantes) pour le secteur industriel sont disponibles : l'efficacité énergétique du secteur industriel chinois s'améliore depuis 10 ans, on peut supposer que cela va se poursuivre. Une analyse sur l'évolution structurelle de l'industrie en Asie et sur les logiques de délocalisation des pays industrialisés vers ce continent manque.

En revanche, les explications pour le secteur résidentiel/tertiaire /agriculture ne sont pas évidentes. Une grande partie de la population asiatique restera-t-elle exclue du développement économique ? L'accès aux biens consommateurs d'énergie (exemple : réfrigérateur, etc.) est-il limité pour les ménages ? Dans quelle mesure l'activité tertiaire se développe-t-elle ? Assiste-t-on à une amélioration considérable de l'efficacité énergétique dans ces secteurs, avec une forte diffusion des technologies efficaces, freinant ainsi la hausse de la consommation d'énergie ? Les interrogations sont nombreuses et mériteraient de s'y attarder.

➤ La consommation d'énergie par habitant du secteur résidentiel/tertiaire de l'OCDE Pacifique et Europe (0.8 en 2000 à 1.2 tep en 2030) converge avec celle de l'Amérique du Nord (1.3 en 2000 à 1.4 tep en 2030). Les modes de vie de l'Amérique du Nord vont-ils se diffuser à l'ensemble de l'OCDE (climatisation généralisée, etc.) ? La tendance actuelle est certainement à la convergence de certaines pratiques.

➤ La consommation de l'industrie de l'OCDE stagne de 1971 à 2030 (à quelques zones près). Est-ce structurel (de fortes délocalisations, si c'est le cas, cela n'apparaît pas immédiatement sur la consommation de l'industrie asiatique) ? Ces délocalisations ont-elles déjà eu lieu ? Est-ce une amélioration continue de l'efficacité énergétique ?

Les limites du scénario de référence de l'AIE :

➤ Le premier constat est le non respect par ce scénario des objectifs environnementaux, et notamment liés à l'effet de serre. Les émissions de CO2 en 2030 sont près de 2 fois plus élevées qu'en 1990, niveau recommandé pour 2040 pour stabiliser à terme la concentration de GES dans l'atmosphère à 450 ppm.

➤ Le deuxième point important est l'accès à l'énergie. Est-il acceptable en 2030 d'avoir une large proportion de la population mondiale sans accès à des formes modernes d'énergie ?

En conclusion, étant donné les limites révélées par le scénario de l'AIE, il est indispensable de se poser la question des alternatives aux trajectoires de consommations d'énergie actuelles.

⁵ Il faut noter que le scénario de l'AIE n'est pas un scénario tendanciel car il n'intègre aucune nouvelles mesures politiques après 2002.

VII Quelles alternatives au scénario de référence de l'AIE

Les scénarios analysés ont été construits par le Conseil Mondial de l'Énergie (CME)⁶, et le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat (IPCC)⁷. Dans les deux cas, il y a des scénarios sans interventionnisme politique, qui se différencient par des niveaux de croissance économique et de progrès

technologique plus ou moins importants (pour l'IPCC : A1 et A2, et pour le CME : A et B) et des scénarios de volontarisme politique pour traiter des thèmes tels que l'environnement et l'équité internationale (C pour le CME et B1 où les politiques sont établies au niveau international et B2 au niveau local pour l'IPCC). Pour la demande, les scénarios volontaristes se caractérisent par la mise en place de politiques de maîtrise de la demande d'énergie.

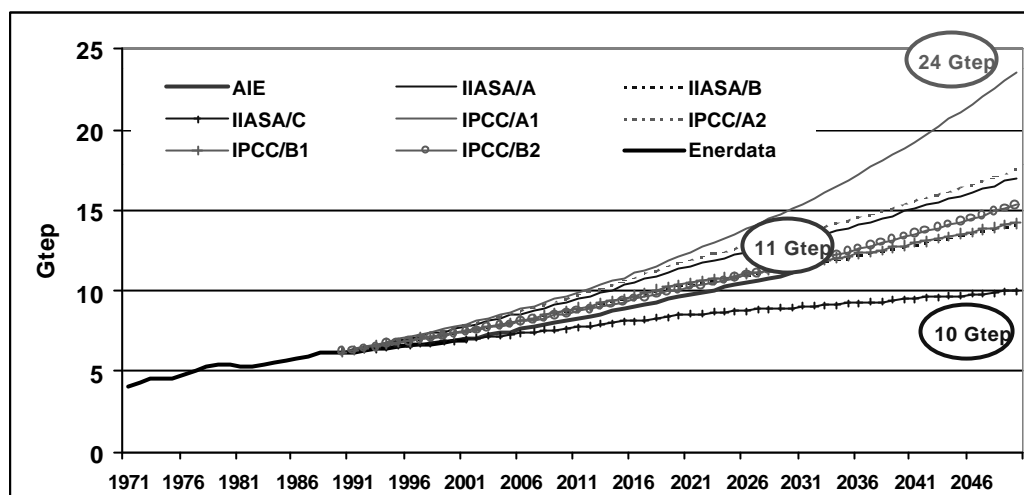


Figure 4 : Consommation finale d'énergie dans le monde de 1971 à 2001
(source EDF à partir d eAIE, Conseil mondial de l'énergie et IPCC)

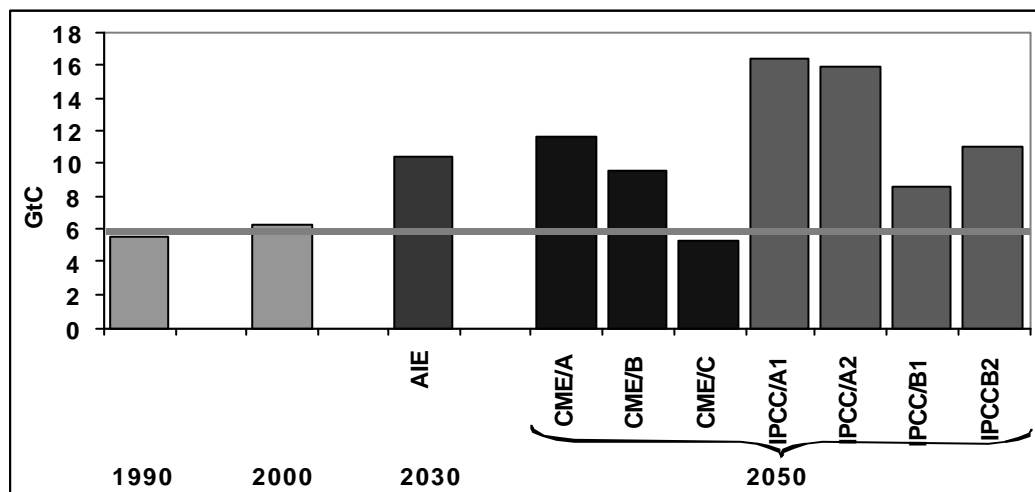


Figure 5 : Émissions annuelles de carbone
(source EDF à partir de AIE, Conseil mondial de l'énergie et IPCC)

⁶ « Global Energy Perspectives » du Conseil Mondial de l'Énergie (1998)

⁷ « Emission Scenarios » de l'Intergouvernemental Panel on Climate Change (2000)

Stabiliser la concentration de GES dans l'atmosphère impose de limiter nos émissions à 3 Gtéquivalent carbone. L'échéance à laquelle le monde atteindra cette cible déterminera le niveau de concentration de GES dans l'atmosphère. La concentration sera d'autant plus faible que la cible sera atteinte rapidement. Pour stabiliser à 450 ppm, le GIEC recommande d'être passée en dessous des 6 GtC avant 2040.

À l'exception du scénario C du CME, aucun scénario ne respecte cette recommandation. Même les scénarios volontaristes de l'IPCC se situent bien au-dessus.

Le scénario C décrit un monde sobre où la demande finale d'énergie atteint 10 Gtep en 2050 (contre 7 aujourd'hui). Il nécessite la mise en place de politiques très volontaristes aux niveaux national et international. Dans ce scénario, ainsi que dans de nombreuses études, la moitié de l'effort pour limiter les émissions de CO2 est réalisé grâce à une maîtrise forte des consommations d'énergie, l'autre moitié étant atteinte par la décarbonisation des filières énergétiques (développement des énergies renouvelables, etc.).

VIII Conclusion

➤ Compte tenu des risques attendus (environnement, sécurité d'approvisionnement), **maîtriser la demande apparaît incontournable**. Les inflexions des tendances doivent être engagées aujourd'hui.

➤ L'importance de **l'Asie en développement** dans la demande d'énergie mondiale des prochaines décennies est confirmée. Il est nécessaire d'étudier cette région afin de connaître les dynamiques de la demande d'énergie (par secteur, par usage) et les marchés associés, et de réfléchir aux voies de développement sobre que pourraient prendre dès aujourd'hui ces pays.

➤ L'accroissement de la demande d'énergie est concentrée dans les **villes moyennes** (moins de cinq millions d'habitants). Quelles seront les modalités de développement de ces villes (urbanisme, etc.) ?

➤ **La demande dans les transports explose** quelles que soient les régions, ce qui entraîne des tensions considérables sur les ressources et sur l'environnement. Les améliorations technologiques (par exemple amélioration des rendements des véhicules) seront-elles suffisantes ?

Si les leviers pour maîtriser la demande d'énergie dans les transports (amélioration de l'efficacité énergétique, changement des modes de déplacement) sont difficiles à mettre en œuvre, **les exigences pour maîtriser l'énergie vont se reporter sur les usages stationnaires thermiques et électriques** (dont les acteurs sont bien identifiés).

➤ **La consommation d'électricité va croître considérablement** dans le monde et même dans les pays industrialisés, avec peut-être le développement de nouveaux besoins. Une maîtrise des consommations d'électricité pourrait devenir une priorité, mais les modalités seront certainement différentes de celles adoptées dans le transport.

➤ **L'accès limité à l'énergie** moderne pour toute une partie de la population est une priorité. L'accès à l'énergie va de pair avec l'utilisation d'équipements consommateurs d'énergie efficaces.

IX Principales sources bibliographiques

- « Global Energy Perspectives » du Conseil Mondial de l'Energie (1998)
- « Emission Scenarios » de l'Intergovernmental Panel on Climate Change (2000)
- « World Energy Outlook 2002 » de l'Agence Internationale de l'Energie (2002)
- « L'intensité énergétique dans les pays industrialisés » de Jean-Marie Martin (1988)
- « Energy and the Challenge of Sustainability » - World Energy Assessment (2000)
- Enerdata

Situation énergétique mondiale à l'aube du 3^{ème} millénaire. Perspectives offertes par les ressources renouvelables.

Bernard MULTON, Gael ROBIN, Marie RUELLAN, Hamid BEN AHMED

Antenne de Bretagne de l'École Normale Supérieure de Cachan – SATIE (UMR CNRS 8029)

Campus de Ker Lann - 35170 BRUZ

I- Impact des activités énergétiques

Le 20^{ème} siècle aura, sans doute, été celui de la prise de conscience planétaire, notamment des limites des capacités de la Terre. Ainsi, l'humanité, du moins la part qui en a les moyens, a « inventé » la notion de développement durable. En 1987, le rapport Brundtland (Commission sur l'environnement et le développement de l'ONU) [Brund_97] l'a définie de la façon suivante : « Satisfaire les besoins actuels, sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire les leurs ». Il s'agit de répondre aux besoins fondamentaux des humains : alimentation, santé, eau, énergie... Les sommets de Rio (1992), de Kyoto (1997) puis de Johannesburg (2002) [Joha_02] ont tenté d'ouvrir pour élaborer des règles afin de renverser une tendance dangereuse pour l'environnement, pour nous, pour notre économie et, bien entendu, pour nos enfants...

Un progrès a été franchi avec la quantification, sans doute critiquable, de l'impact des activités humaines sur l'écosystème. Le WWF (World Wide Fund For Nature) a proposé la notion d'*Empreinte Ecologique Mondiale* (en anglais : World Ecological Footprint) [WWF_02]. Il s'agit de la surface exploitée ou « consommée » pour les différentes activités humaines. Sur les 45 milliards d'ha (Gha) de la surface du globe, les auteurs du rapport estiment que seulement 11,4 Gha sont biologiquement productifs. La figure 1 décrit l'évolution de l'empreinte écologique depuis 1960. Il apparaît que depuis les années 1980, nous vivons au-dessus des moyens de notre planète, en 2002, nous l'épuisons avec une intensité de « 1,37 Terres ».

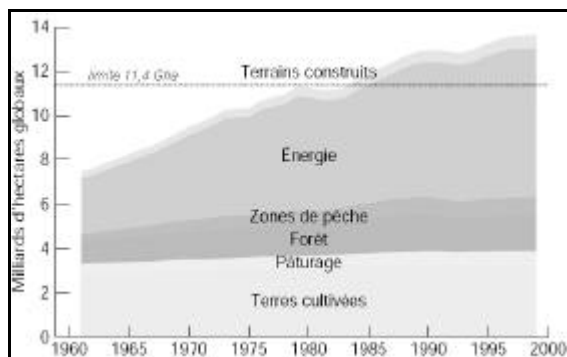


Figure 1 : Empreinte Ecologique Mondiale d'après le rapport du WWF [WWF_02].

On peut constater que l'énergie représente plus de 50% de l'empreinte totale. La figure 2 montre l'empreinte par habitant, on peut y constater que les pays riches et

industrialisés sont les plus grands dilapidateurs, la moyenne acceptable étant de 1,9 ha par habitant.

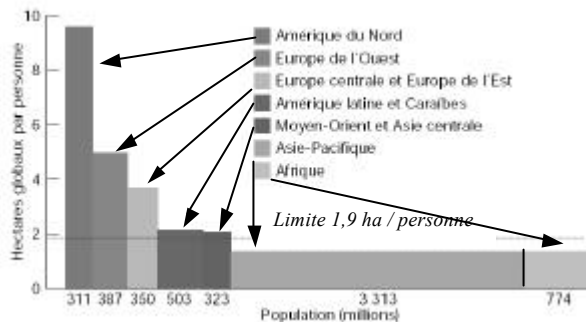


Figure 2 : Empreinte Ecologique Mondiale par habitant selon les régions, d'après le rapport du WWF [WWF_02].

Les manipulations énergétiques des Hommes conduisent à l'épuisement de précieuses ressources naturelles ainsi qu'à de violentes pollutions dont les rejets de gaz à effet de serre. Il ne subsiste aujourd'hui plus beaucoup de doute sur le fait que la combustion massive de combustibles fossiles est responsable d'une très sensible augmentation de l'effet de serre naturel, c'est-à-dire d'un accroissement de la température moyenne à la surface du globe. Une extraordinaire corrélation entre cette consommation de carburants fossiles et la concentration de CO₂ dans l'atmosphère a été montrée (figure 3) et constitue l'une des « preuves » les plus tangibles de l'impact des activités humaines.

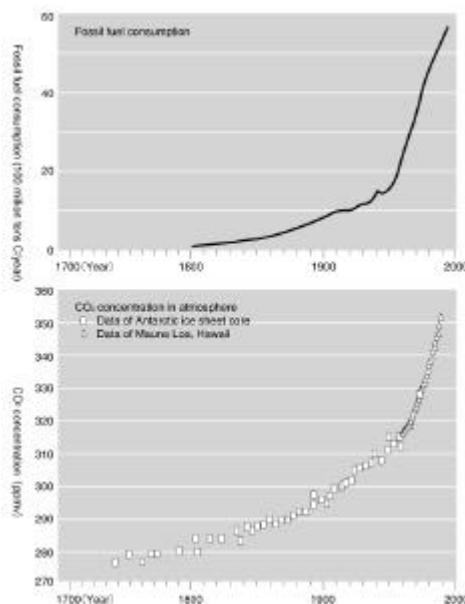


Figure 3 : corrélation consommation de carburants fossiles et concentration de CO₂ [Matsumo_87].

Une tonne de carbone brûlée génère environ 3,7 tonnes de CO₂. Les rejets de gaz à effet de serre sont tantôt mesurés en tonnes équivalent CO₂ (par exemple, à masse égale, le méthane est 14 fois plus « efficace » que le CO₂) tantôt en tonnes de carbone. Le CO₂ est responsable d'environ 50% de l'accroissement global de l'effet de serre. En 2002, nous avons renvoyé, dans l'atmosphère, 24 milliards de tonnes de CO₂, soit 6,5 milliards de tonnes de carbone sur un cycle naturel d'environ 1000 milliards de tonnes. En à peine plus de deux siècles, nous aurons renvoyé dans l'atmosphère une quantité de carbone colossale qui avait mis des centaines de millions d'années pour être piégée par les organismes vivants (végétaux et animaux). A la lumière des connaissances actuelles, il nous semblerait maintenant étonnant que cela puisse être sans conséquences !

La métaphore énoncée par Peter CREOLA (Pdt du Long Term Space Policy Committee à l'ESA, European Space Agency) est explicite [Cre_96]. Si l'on trace la courbe temporelle de la puissance correspondant à la combustion des ressources fossiles à l'échelle de l'existence de l'humanité, on obtient le tracé de la figure 4. Alors, cette courbe fait penser à « l'allumette que les humains ont craquée dans les ténèbres de l'éternité ». Cette allumette va s'éteindre et nous devons très vite prendre des mesures pour préparer un avenir durable.

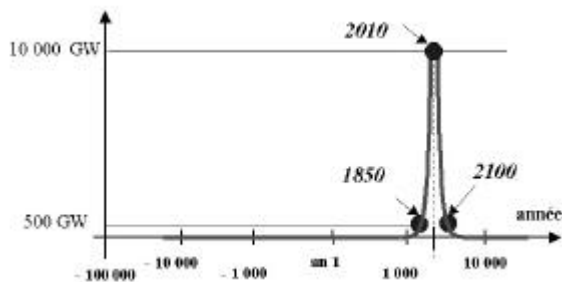


Figure 4 : Courbe de la puissance mondiale de combustion des carburants fossiles.

Il n'est plus à démontrer à quel point nous avons besoin d'énergie pour assurer notre existence. Mais nous devons nous poser plusieurs questions fondamentales :

- pouvons nous maintenir notre niveau actuel de consommation énergétique (pays riches) tout en préservant notre écosystème ?
- est-il nécessaire de consommer autant d'énergie pour bien vivre ? Peut-on consommer mieux ?
- tous les humains de la Terre peuvent-ils accéder à notre niveau de confort ?
- n'est-il pas déjà trop tard quant à des conséquences écologiques irréversibles ? Ne faut-il pas prendre des mesures permettant de faire plus que réduire simplement nos rejets de CO₂ ?
- s'il s'avère nécessaire de changer de civilisation énergétique, comment réaliser les transitions ?
- comment réduire la vulnérabilité de nos systèmes énergétiques centralisés ?

Bien sûr, nous ne donnerons pas de réponses dans ce modeste papier ! La complexité des problèmes nous dépasse largement. Leur traitement fait appel à la sociologie, l'économie, la politique, la physique, la technologie...

Pour un développement réellement durable, l'économie, qui a longtemps négligé les aspects environnementaux et l'aspect borné de notre planète, va devoir intégrer réellement les contraintes écologistes et sociétales [Jacq_95] [Brow_01]. Dans ce contexte, le secteur de l'énergie revêt une très grande importance.

Faut-il enfin rappeler toutes les guerres qui trouvent, en grande partie, leurs germes dans la recherche d'une domination énergétique.

Nous proposons, dans cet article, d'effectuer un état des ressources énergétiques de la planète et d'analyser nos consommations. Nous montrerons notamment à quel point les ressources renouvelables ont la capacité de nous assurer un haut niveau de confort et avec le maximum de durabilité. Dans un précédent article publié dans la revue 3EI [Mul_98], nous avons effectué un premier bilan d'électricien. Il ne s'agit pas de répéter ce qui a déjà été écrit, mais de présenter une analyse plus synthétique et plus mûre avec des chiffres actualisés.

Dans ce domaine stratégique de l'énergie, les chiffres globaux de consommation, de ressources... sont souvent entachés d'erreurs importantes (volontaires ou non), pour de nombreuses raisons. Il est donc très important de les considérer comme des ordres de grandeurs. La publication [Lah_00] est très intéressante à ce sujet en ce qui concerne les chiffres traitant des carburants fossiles, elle permet de développer un bon esprit critique. On recommandera également l'article de l'association DARLY [Darl_03] pour bien comprendre la terminologie et savoir décoder ses ambiguïtés.

II- Ressources énergétiques de la planète

L'énergie primaire représente l'énergie directement transformable en chaleur. L'électricité issue des centrales thermiques via des cycles thermo-mécaniques (rendements de 30 à 60%) est qualifiée d'énergie finale.

Les Ressources Énergétiques Renouvelables sont, à notre échelle de temps, celles qui sont dispensées continuellement (avec des cycles réguliers) par la nature, elles sont issues du rayonnement solaire, du noyau terrestre et des interactions gravitationnelles de la lune et du soleil avec les océans.

Les Ressources Énergétiques Non Renouvelables, comme leur nom l'indique, sont épuisables à notre échelle. Les carburants fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel...) eux-mêmes issus de l'action du rayonnement solaire sur le carbone et la vie (photosynthèse) pendant des centaines de millions d'années, en font partie. Ils constituent en quelque sorte de l'énergie solaire fossilisée. L'uranium utilisé pour la fission nucléaire ne peut également être considéré comme renouvelable car ses réserves sont limitées.

Quant à l'énergie de la fusion, si nous la maîtrisons un jour, elle peut être qualifiée d'inépuisable à notre échelle. C'est peut-être l'un de ses dangers : une dissipation énergétique démesurée à la surface de la terre pourrait engendrer des bouleversements imprévisibles. Mais si on arrive un jour à en faire une source sans déchets et sûre, elle pourrait participer utilement à l'indispensable diversité de nos ressources énergétiques.

Pour référence, l'humanité consomme, aujourd'hui annuellement, environ 12 Gtep ou 140.10^{12} kWh (en 2002) (biomasse non commerciale comprise, mais hors énergie alimentaire), soit une quantité correspondant à 1/8000^{ème} de l'énergie solaire qui arrive à la surface de la terre (voir Fig. 8).

Les ressources énergétiques renouvelables [CHAB_97]

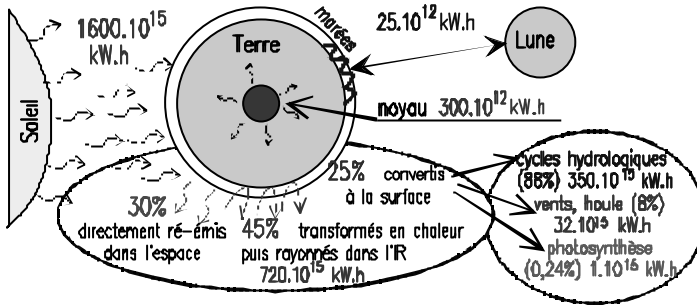


Figure 5 : Sources et répartition quantitative annuelle des énergies renouvelables [Mul_99].

Le rayonnement solaire

Rayonnement solaire au sol : l'énergie reçue à la surface de la terre (au total 720.10^{15} kWh) varie, par m², entre 1100 kWh et 2300 kWh/an, soit une puissance moyenne (répartie sur l'année en tenant compte des alternances jour-nuit et des périodes nuageuses) de 120 à 260 W par m² et une puissance crête de plus de 1 kW/m². Une grande partie frappe les océans et donne ce que l'on nomme communément l'énergie thermique des mers soit environ 80.10^{12} kWh (dans les zones tropicales, l'écart de température entre les eaux de surface et celles à 1000 m de profondeur atteint 20°C).

L'ensemble des cycles hydrologiques convertit environ 360.10^{15} kWh. L'évaporation de l'eau (principalement des océans) conduit à des précipitations canalisées ensuite par les rivières et les fleuves. Les vents et la houle résultent également de ces cycles et constituent également une source d'énergie exploitable.

L'énergie hydraulique récupérable atteint 40.10^{12} kWh et la valeur techniquement exploitable vaut, selon les estimations, entre 15 et 20.10^{12} kWh (8 déjà estimés économiquement rentables) [Obser_Dec00].

L'énergie éolienne, également exploitée depuis longtemps (propulsion à voile, moulins à vent, pompes à eau), représente une ressource énorme, 32.10^{15} kWh, dont la part terrestre exploitable est estimée à 50.10^{12} kWh/an. Une grande partie se trouve «off-shore», en effet les vents soufflent beaucoup plus fort au large et, surtout, plus régulièrement. La puissance récupérable par les aérogénérateurs modernes est de l'ordre de 500 W par m² balayés pour des vents de 15 m/s avec des productivités annuelles (dans des sites assez ventés) de 900 kWh/m² par an.

L'énergie de la houle (due à l'action du vent sur la surface des mers et des océans) disponible est évaluée à 8.10^{12} kWh dont 90.10^9 kWh/an techniquement utilisables (la puissance par mètre de front de vague vaut environ 50 kW).

Biomasse : il s'agit du produit de la photosynthèse. La part renouvelable annuellement (environ 20%) de la biomasse représente une énergie d'environ 800 à 900.10^{12} kWh. On estime que la part aisément exploitable (en assurant notamment un renouvellement) atteint 60.10^{12} kWh. Il est difficile de connaître la quantité de biomasse réellement utilisée car elle échappe en majeure partie aux circuits commerciaux. Il est couramment admis l'ordre de grandeur de 1,5 à 2 Gtep annuelles (environ 20.10^{12} kWh) pour la biomasse « non commerciale ». Les besoins énergétiques alimentaires des 6 milliards d'humains sont d'environ 700 Mtep par an [Comb_01], la consommation de viandes accroît le prélèvement énergétique global sur la biomasse à environ 1 Gtep.

La géothermie

Le noyau terrestre en fusion dégage une énergie annuelle d'environ 300.10^{12} kWh (flux géothermique variant de 0,05 à 1 W/m², ce qui est très faible par rapport au rayonnement solaire). Les réserves exploitables sont d'environ 40.10^9 kWh en haute énergie (150 à 350°C, utilisée pour la production d'électricité) et 300.10^9 kWh en basse énergie (50 à 90°C pour le chauffage).

Les interactions gravitationnelles Terre-Lune-Soleil

Les marées sont le produit de ces interactions. L'énergie annuelle des courants marins représente environ 25.10^{12} kWh. La partie exploitable est assez difficile à déterminer, dans les zones à forte marée présentant un étranglement, on l'estime entre 270 et 500.10^9 kWh (l'usine de la Rance produit annuellement : $0,54.10^9$ kWh). Mais on imagine aujourd'hui placer des turbines sous-marines sans canalisation des courants, comme des éoliennes.

Ressources annuelles	Solaire	bio-masse	Cycles hydrologiques	Géo-thermie	Marées	
estim. Glob. kWh	700.10^{15}	$4,5.10^{15}$	360.10^{15}	300.10^{12}	25.10^{12}	
part exploitable	---	60.10^{12}	hydro 20.10^{12}	éolien 50.10^{12}	houle 90.10^9	HTemp 40.10^9
	q. 10.10^{12}		estuaires 500.10^9			

Tableau 1 : Estimation des ressources d'énergie renouvelables et de leur part exploitable en kWh annuels

Notons que ce ne sont pas forcément les sources les plus importantes en quantité qui sont les plus rentables ou les plus avantageuses. Les meilleures sources renouvelables dépendent de nombreux paramètres, notamment du site. Ainsi, toutes les sources évoquées trouvent des applications. Précisons enfin que leur exploitation massive peut aussi être source de perturbation de l'environnement et subir le refus de la population.

Les ressources énergétiques non renouvelables [Web_IFP] [Web_EIA] [CEA_02]

Il s'agit des carburants fossiles : pétrole, charbon et gaz naturel, pour les plus connus et des combustibles nucléaires pour la fission, soit l'uranium. Depuis 1970, nous avons doublé notre consommation de pétrole. Le pétrole représentait alors 45% de l'énergie primaire alors

que cette proportion est tombée à 34%. Ces ressources présentent l'avantage d'un « faible » coût mais l'inconvénient d'être polluantes. Il est cependant possible de réduire les rejets (filtrage dans les cheminées, pots catalytiques...) mais cela nuit à leur compétitivité.

Ressources non renouvelables	Pétrole	charbon	gaz naturel	schistes bitumineux Sables asphaltiques	Hydrates méthane	Uranium 80 à 130 \$/kg
Réserves exploitables kWh	1,7.10 ¹⁵	5,1 à 7,5.10 ¹⁵	1,6.10 ¹⁵	?	?	0,36 à 0,46.10 ¹⁵
réserves totales estimées kWh	4.10 ¹⁵	?	?	qq 10 ¹⁵	2 à 10.10 ¹⁵	1,9. 10 ¹⁵
Durée au rythme année 2003	36 ans	170 à 260 ans	56 ans	---	---	40 à 50ans
Durée ramenée à la totalité de la conso. primaire	12 ans	36 à 53 ans	11 ans	qq 10 ans	15 à 70 ans	2 à 3 ans

Tableau 2 : Estimation (2001) des ressources non renouvelables et des durées d'exploitation sur la base de la consommation actuelle ou (dernière ligne) rapportées à la totalité des besoins actuels.

Le tableau 2 donne un ordre d'idée des réserves connues mais attention, les durées indiquées sont très hypothétiques et fondées sur les réserves connues exploitables ainsi que sur le rythme actuel de la consommation. La ligne réserves totales estimées correspond à des évaluations géologiques hypothétiques et à des coûts d'extractions prohibitifs.

Pétrole

Pendant longtemps, la prospection pétrolière intensive a, en moyenne, révélé, chaque année, l'équivalent de ce qui avait été consommé l'année passée. Mais, durant ces deux dernières années, les réserves prouvées ont commencé à diminuer [Laher_03]. La figure 6 montre que nous arrivons vers le sommet de la courbe de production de combustibles liquides.

Quant au gaz naturel, l'accélération de sa consommation (+ 2,5% par an) va réduire rapidement son « espérance de vie ».

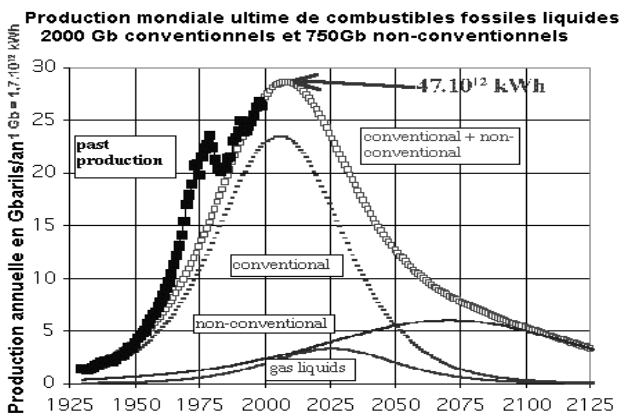


Figure 6 : Evolution de la production annuelle de combustibles fossiles liquides [Laher_00]

Les schistes bitumineux commencent à être exploités de façon économiquement rentable et accroissent les réserves de pétrole brut, bien que le bilan environnemental soit parfois catastrophique (très grande consommation d'énergie notamment). Malgré tout, nous

disposons d'une durée très limitée d'exploitation des carburants fossiles qu'il est difficile d'évaluer objectivement. Il est ainsi très probable que nous aurons épuisé le gaz naturel et le pétrole durant le XXI^{ème} siècle.

Les carburants fossiles représentent un enjeu politico-économique majeur et sont ainsi l'objet de convoitises permanentes, surtout le pétrole qui est aujourd'hui l'incontournable ressource dans le domaine des transports. Comme plus de 65% des réserves sont concentrées au Moyen-Orient, on comprend aisément les raisons des conflits à répétition qui s'y déroulent.

Les fluctuations du cours du pétrole sont de grande amplitude et perturbent les économies des états qui en dépendent. En France et en Europe, grâce à une forte taxation, les prix à la consommation sont assez bien lissés, mais le coût supporté par la collectivité reste très élevé lorsque le cours monte.



Figure 7 : Evolution du prix du pétrole en France (source : bulletin Prix des Energies, janvier 2004 de la DGEMP)

Charbon

Les réserves de charbon sont encore très importantes (surtout en Amérique du Nord, en Inde et en Chine) et leur exploitation va connaître probablement une forte croissance au cours du siècle prochain. Il sera alors nécessaire de sérieusement dépolluer sa combustion, des solutions industrielles de piégeage du CO₂ commencent d'ailleurs à émerger et pourraient créer une révolution dans le secteur énergétique... si les surcoûts restent compatibles avec le marché.

Si les mesures proposées dans le protocole de Kyoto étaient appliquées, la tonne de carbone rejetée coûterait au pollueur environ 100 €(ou encore 27 €par tonne de CO₂) ce qui aurait pour effet d'augmenter le prix de revient des carburants fossiles de façon dissuasive [Bir_01].

En parallèle, il est de plus en plus sérieusement envisagé de réduire les rejets de gaz à effet de serre, notamment par piégeage du CO₂ [EnPlus_02]. Le coût envisagé en 2002, pour ce piégeage, est de 70 €par tonne de CO₂ [EnPlus_02] ce qui représenterait une sévère augmentation du coût de production de l'énergie électrique.

Nucléaire [Web_CEA] [AGUET_87] [CEA_02]

L'uranium 235 utilisé dans les réactions de fission nucléaire est issu de l'uranium naturel lui-même épuisable, mais il est contenu en très faibles proportions (0,7%) dans l'uranium naturel. Sur la base d'une fission de l'U235, les réserves totales d'uranium naturel sont estimées à 1900.10¹² kWh dont seulement 360 pour un

prix d'extraction inférieur à 80\$/kg, jugé actuellement acceptable (ou 460 pour un prix inférieur à 130\$/kg [CEA_02]). Au prix du marché actuel (26\$/kg), le coût de l'uranium, dans le coût global de production d'électricité nucléaire, ne représente qu'une faible part (moins de 5%). Ceci est considéré comme un avantage de moindre sensibilité aux fluctuations de cours.

L'uranium 238, très abondant dans l'uranium naturel (99%), est transformable en matière fissile dans les surgénérateurs. Il offrirait, si les surgénérateurs fonctionnaient à l'échelle industrielle, une réserve de $80 \cdot 10^{15}$ kWh, soit 10 fois les réserves connues de charbon.

Inconvénient majeur de la fission, les déchets qui coûtent cher à retraiter et, après retraitement, conservent, pour une part d'entre eux, une radioactivité élevée à longue durée de vie. Leur stockage pose le problème de la pérennité et de la mémoire des sites.

La fusion devrait nous libérer du problème des déchets car elle est sensée être propre. Le deutérium et tritium sont en abondance suffisante : un litre d'eau de mer contient, en deutérium, de quoi fournir 1MWh. Le tritium doit être fabriqué, par exemple à partir du lithium dont les ressources terrestres offriraient $200 \cdot 10^{15}$ kWh et celles des océans 10^{21} kWh (des millions d'années au rythme actuel). Mais le fonctionnement industriel de la fusion DT est aussi lointain qu'incertain.

III- Consommation primaire d'énergie

III-1- Analyse au niveau mondial

La plupart des chiffres donnés pour l'année 2003 sont issus du rapport International Energy Outlook 2003 [Web_EIA]. Il s'agit des valeurs de l'année 2001 extrapolées vers 2003 avec les taux de croissance actuel.

On peut ainsi donner un ordre de grandeur de la consommation mondiale d'énergie primaire en 2003 d'environ $140 \cdot 10^{12}$ kWh (12 Gtep) dont très approximativement $20 \cdot 10^{12}$ kWh de biomasse non commerciale, pour une consommation finale estimée à 7,1 Gtep. En effet, entre la consommation primaire et la consommation finale, il y a les rendements de conversion électriques, les pertes de transports (électricité, carburants), l'autoconsommation (extraction, raffineries, enrichissement d'uranium...).

Mais tous ces chiffres sont peu sûrs, car il existe souvent une confusion importante entre ces deux chiffres de consommation. D'ailleurs, la notion même de consommation finale serait à revoir, car ce qui compte au fond, c'est le service réellement rendu qui dépend du rendement du process final (s'éclairer, se chauffer, se déplacer...). Il serait donc grandement utile de définir les réels besoins énergétiques.

On aurait alors 3 niveaux d'énergie : **primaire**, **finale** (définition actuelle : en fait celle qui arrive chez le consommateur et qui lui est facturée) et **utile**.

Mais avant d'analyser un peu plus dans les détails les chiffres et sans empiéter sur le sujet abordé dans l'article « La demande mondiale d'énergie sur le long terme » [Lau_04] paru dans ce numéro de la revue 3EI, nous voudrions donner quelques chiffres de l'évolution humaine et de son activité énergétique au cours de

l'histoire de l'humanité, en la faisant débiter il y a 100 000 ans. La population humaine a suivi la courbe d'évolution de la figure 8. On y remarque une accélération à partir de l'an mille. Nous sommes maintenant environ 6 milliards mais il est extrêmement difficile de prévoir combien nous serons au milieu du siècle prochain et notamment si la population va continuer à croître, stagner ou décroître...

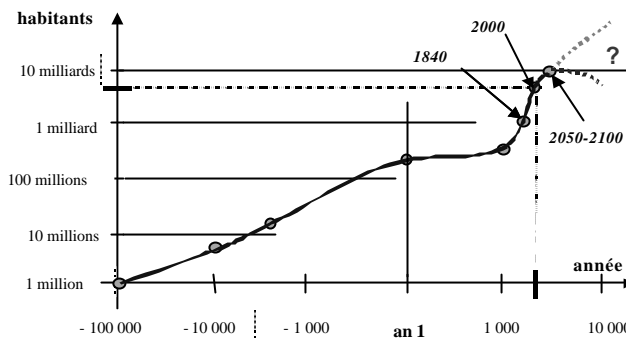


Figure 8 : Evolution de la population humaine sur la terre.

La figure 9 permet de prendre conscience du niveau d'activité énergétique de l'humanité et surtout de son décollage à l'ère industrielle (la puissance moyenne est effectuée en divisant la quantité d'énergie manipulée annuellement par la durée d'un an). Elle atteint aujourd'hui $1/8000^{\text{ème}}$ de la puissance moyenne solaire qui entre dans l'atmosphère et qui nous est accessible. En imaginant que les 10 milliards d'êtres humains qui pourraient vivre prochainement sur la terre consomment autant d'énergie que chaque Américain aujourd'hui, l'humanité «manipulerait» l'équivalent de $1/1000^{\text{ème}}$ de l'énergie solaire interceptée par la terre.

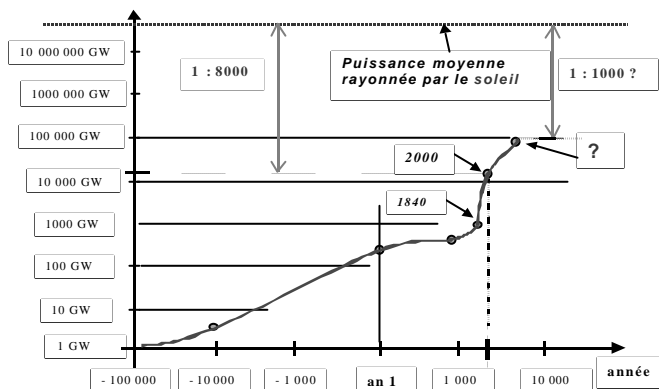


Figure 9 : Evolution de la puissance moyenne des activités énergétiques humaines.

Sur ces 12 Gtep, plus de 80% sont d'origine non renouvelable (figure 9). Le taux de croissance est actuellement de 1,8% par an.

La part non commerciale de l'énergie (biomasse) est rarement prise en compte dans les documents officiels. Elle représente très approximativement 12% de l'énergie primaire au niveau mondial, mais sa part atteint 40 à 90% dans les pays en voie de développement. La figure 10 montre la répartition des ressources énergétiques primaires.

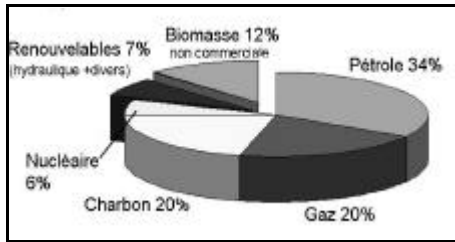


Figure 10 : Répartition par sources des 140.10¹² kWh de la consommation mondiale d'énergie primaire.

Le tableau 3 montre les quantités d'énergie consommées, par habitant et par jour, estimées en 2003.

pays consommation par habitant par jour	USA	France	Monde
% de la consommation primaire mondiale	28%	2,3%	100%
kWh primaires	280	145	63
kWh électriques globaux	35	21	6,8
kWh électriques domestiques	11,5	4,6	?

Tableau 3

La figure 11 donne la répartition de la consommation mondiale par secteurs d'activité. Cette répartition cache de fortes disparités entre pays industrialisés et en voie de développement. Les transports exploitent à 96% le pétrole, l'industrie utilise à parts sensiblement égales pétrole, charbon, gaz naturel, électricité et énergies renouvelables [MUL_3EI98].

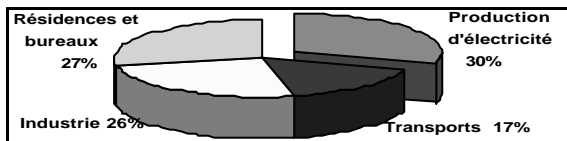


Figure 11 : Répartition par mode de la consommation mondiale d'énergie primaire

L'optimisation énergétique des transports terrestre va très probablement exploiter l'électricité en tant que vecteur produit par un combustible primaire qui pourra, dans un futur plus ou moins lointain être l'hydrogène.

L'énergie massive des combustibles est telle qu'elle représente actuellement la seule solution capable de répondre raisonnablement à nos exigences d'autonomie et de vitesse. Il est donc urgent de trouver des carburants de substitution au pétrole, voire au gaz naturel. Les biocarburants peuvent, dans ce contexte, jouer un rôle significatif mais ils ne peuvent à eux seuls résoudre le problème énergétique général des transports. Une production propre d'hydrogène serait alors une solution très attractive. Mais nous sommes encore loin de disposer des moyens économiques et propres nécessaires. L'électrolyse de l'eau par une électricité d'origine renouvelable peut constituer l'une des voies. Avec une électricité éolienne offshore à 5c€/kWh, on pourrait obtenir de l'hydrogène à 9c€/kWh et, compte tenu du « coût » de la compression, du stockage et de la distribution, un carburant à 12 c€/kWh_{th} [Tri_03]. Cela reste néanmoins coûteux, pour comparaison, un coût de 1 €/litre TTC pour de l'essence correspond à 8,3c€/kWh_{th} et à seulement 2 c€/kWh_{th} hors taxes.

III-2- Consommation d'énergie primaire en France [ObsEn_FR02] [DGEMP_03] [Web_IFP]

En 2002, la France a consommé environ 3,2.10¹² kWh primaires (275 Mtep). La répartition par sources est fournie à la figure 12, on y remarque la part significative du pétrole (95 Mtep) et de l'électricité primaire (114 Mtep) (hydraulique et nucléaire intégrant un rendement d'environ 33%), sachant qu'une part de l'électricité est produite avec du gaz, du charbon et du pétrole, au total plus de 30 TWh_e. Les 144 Mtep d'électricité primaire correspondent en fait à une production de 64 TWh hydrauliques et de 415 TWh nucléaires. Les évolutions consécutives au choc pétrolier de 1973 y apparaissent de façon flagrante. Mais la dépendance du pétrole reste un point délicat. La facture énergétique annuelle globale en 2002 était d'environ 25 G€ dont environ 20 dus au seul pétrole.

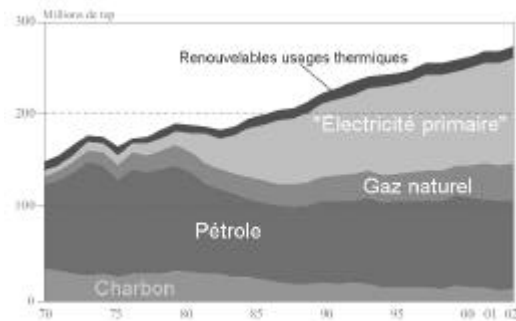


Figure 12 : Répartition par sources de la consommation française d'énergie primaire [DGEMP_03]

La figure 13 montre cette fois la consommation finale d'énergie par secteurs. Les secteurs résidentiel et tertiaire apparaissent en un unique poste, ils se répartissent en réalité respectivement 70 et 30% des 70Mtep en 2002.

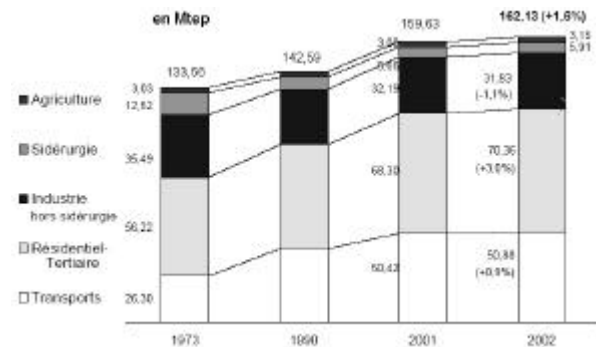


Figure 13 : Evolution et Répartition par secteur de la consommation française finale d'énergie primaire (DGEMP)

La figure 14 montre l'évolution et la répartition par secteur des rejets de CO₂. On peut constater une relative diminution de nos rejets jusque dans les années 80, puis une nouvelle augmentation ensuite... La production d'électricité nucléaire a permis de placer les Français parmi les moins pollueurs des pays industrialisés... si l'on oublie nos déchets radioactifs. Les transports représentent le seul secteur qui dérape et tout particulièrement celui exploitant la route (voir figure 15) avec quasiment 80% de la consommation totale et le taux de croissance le plus élevé.

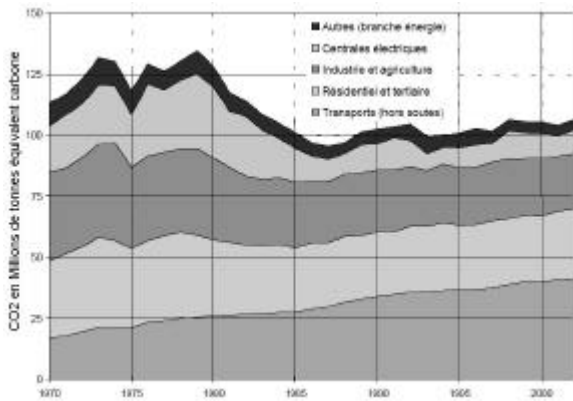


Figure 14 : Evolution des rejets de CO2 en tonnes équivalent carbone [DGEMP_03]

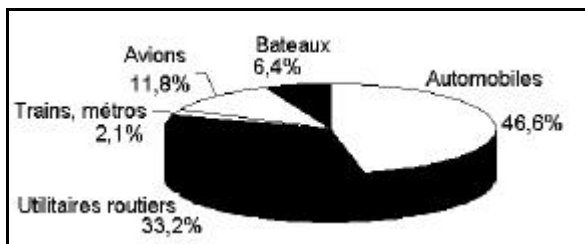


Figure 15 : Répartition de la consommation d'énergie des transports (DGEMP)

III-3- Prévisions

Nous avons maintenant conscience qu'un raisonnement à l'échelle planétaire est indispensable bien que ce soit souvent à l'échelle des nations que peuvent se prendre les décisions politiques et à l'échelle des citoyens que les pratiques peuvent influencer nos modes de consommation.

Nous avons vu précédemment que la consommation planétaire annuelle d'énergie primaire, aux alentours de l'an 2000, était de $140 \cdot 10^{12}$ kWh. Bien que les scénarii mondiaux soient nombreux (Agence Internationale de l'Énergie, Conseil Mondial de l'Énergie, Département Américain de l'Énergie...), ils s'accordent tous pour prévoir une croissance de la consommation mondiale, principalement «à cause» du développement des pays comme la Chine, l'Inde etc... La figure 16 montre les évolutions passées et prévues (différents scénarii) de la consommation d'énergie primaire au niveau mondial.

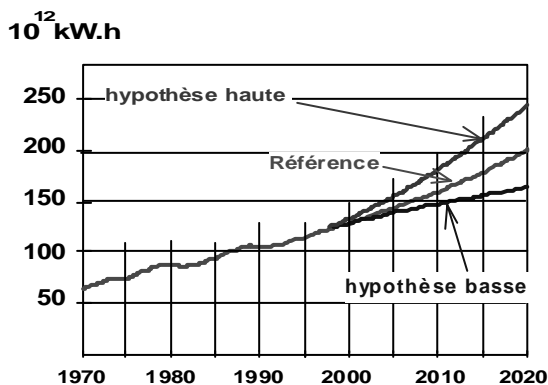


Figure 16 : Hypothèses de croissance de la consommation d'énergie primaire [Web_EIA]

Cependant, ces dernières années, les prévisions de croissance énergétique ont été revues à la baisse, ce qui pourrait refléter un début de prise de conscience. On commence notamment à comprendre que les diverses pollutions vont coûter très chers et que les changements énergétiques (modes de production et consommation) peuvent être générateurs de nouvelles richesses et d'emplois [Brow_01]... La figure 17 donne les prévisions d'évolution mondiale, selon les ressources, du DOE (Department Of Energy des USA). On peut constater ou déplorer que peu de changement dans les ressources soient envisagés à l'horizon 2025... La courbe de croissance est en contradiction avec celle de la figure 6 dont les chiffres proviennent d'un auteur pessimiste. L'avenir nous dira qui avait raison...

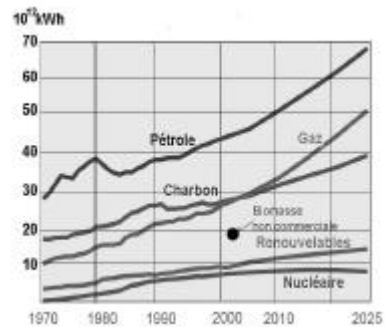


Figure 17 : Prévisions de croissance des ressources primaires jusqu'en 2020 [Web_EIA]

La part des ressources renouvelables augmentera probablement par nécessité mais il semble, d'après les prévisionnistes que cela vienne beaucoup plus tard. Le pétrolier Shell, dans l'un de ses scénarii, n'envisage les changements radicaux dans le bouquet énergétique planétaire qu'au-delà de 2020 comme le montre la figure 18.

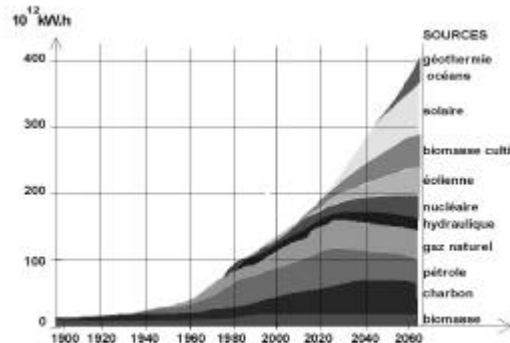


Figure 18 : Prévision d'évolution des sources d'énergie [Web_Shell]

IV- L'énergie électrique (Note : 1 TWh = 10^9 kWh)

IV-1- Production

La production d'électricité consomme environ le tiers de l'énergie primaire mondiale alors qu'elle représente une part finale bien plus faible. En effet, elle est, à plus de 80% (figure 21), d'origine thermique non renouvelable (fossiles et nucléaire) et son rendement de conversion est faible, de l'ordre de 30% à 60% dans le meilleur des cas, c'est-à-dire celui des turbines à cycles

combinés. De plus en plus souvent, la chaleur résiduelle est récupérée dans des cogénérateurs, mais cela ne concerne malheureusement pas le gros du parc actuel. Notons que la cogénération centralisée se heurte à deux problèmes. Le premier est lié aux médiocres possibilités du transport de chaleur à longue distance qui limitent beaucoup ses applications. Le second concerne l'application des directives. En France, pays excédentaire en électricité, on construit des usines de cogénération à la place de chaufferies pour des raisons d'attractivité économique (incitation à la cogénération), ce qui conduit à brûler plus de combustible que nécessaire pour produire, en plus du chauffage, une électricité qui n'était pas indispensable et qui rejette du CO₂...

Le taux de croissance mondial de la production d'électricité est de 2,4%/an. Mais ce chiffre cache des disparités importantes : 3,5%/an dans les pays en développement dont 4,3% en Chine et 1,7%/an dans les pays industrialisés [Web_EIA].

Aux niveaux mondial et français, nous sommes passés respectivement d'une production d'électricité de 120 et 3TWh en 1920 à plus de 15 000 (facteur 125) et 547 TWh (facteur 180) en 2003. Certains pays exportent de l'électricité (la France : 1^{er} exportateur au monde) tandis que d'autres en importent, il ne faut donc pas confondre consommation intérieure et production.

En France en 2003 [RTE_03], sur les 547,7 TWh produits, 10,4 ont été autoconsommés par les producteurs, 31,7 ont été « perdus » sur les réseaux de transports, de distribution et de répartition (ce qui est perdu dans les postes de conversion des clients, qui achètent leur électricité en HTB, n'est pas comptabilisé) et 73,1 TWh ont été exportés.

Pour mieux adapter la production à la consommation, on exploite des centrales de pompage-turbinage (puissance installée de 6,3 GW sur un total national de 116,4 GW). La « production » de ces centrales particulières, qui peuvent également turbiner de l'eau issue des cycles hydrologiques naturels, est comptabilisée dans l'ensemble de la production hydroélectrique. La comptabilité, effectuée en 2002, montre que le pompage a consommé 7,4 TWh et produit 6,5 TWh (en fait l'énergie produite correspond, au rendement près, à celle pompée augmentée des apports naturels).

Les figures 19 et 20 montrent respectivement la courbe de croissance de la production mondiale d'électricité avec une prévision jusqu'en 2020 [Web_EIA] et l'évolution de la production française depuis 1970.

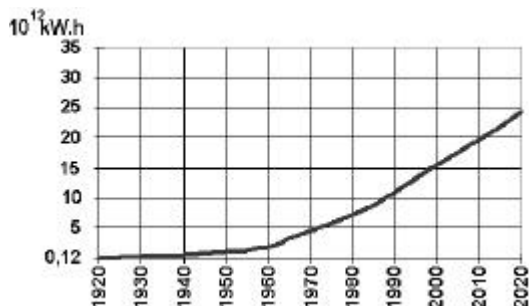


Figure 19 : Evolution et prévision de la production mondiale d'énergie électrique (10^{12} kWh = 1000 TWh)

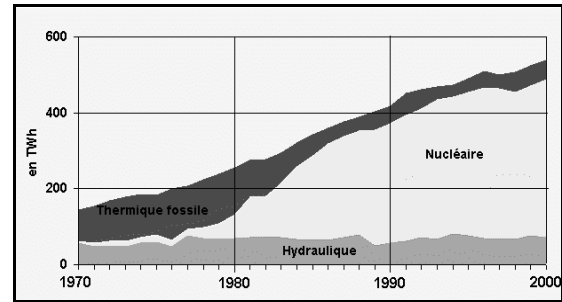


Figure 20 : Evolution production d'énergie électrique française (DGEMP)

La capacité de production au niveau mondial était d'environ 3400 GW en 2000. La figure 21 montre la répartition par sources, au niveau mondial, en puissance installée et en énergie produite [IEA] :

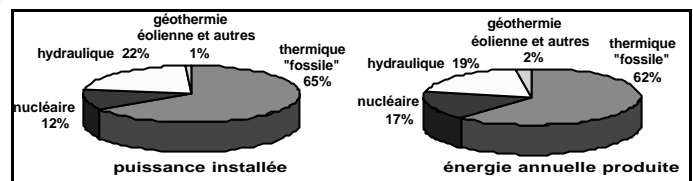


Figure 21 : Répartition de la production électrique en puissance installée (3400 GW) et en énergie produite (15.10^{12} kWh)

En ramenant les 15 000 TWh produits aux 3400 GW installés, tout se passe comme si l'ensemble du système de production fonctionnait en moyenne 4400 heures par an soit environ la moitié du temps (respectivement : 4000h, 6280h, 3800h et 7640h par an pour le thermique classique, le nucléaire, l'hydraulique et les autres).

IV-2- Consommation d'électricité

Nous avons constaté que la production d'électricité contribuait beaucoup à l'épuisement des ressources et à la pollution de la planète. Il est maintenant utile d'analyser ses usages, ceux dits spécifiques, pour lesquels on considère que l'électricité est la source la mieux adaptée : éclairage, force motrice, traitement de l'information... et ceux, non nommés, qui constituent une solution de facilité mais qui coûtent souvent cher à l'environnement, par exemple le chauffage des locaux et de l'eau sanitaire.

Les « usages spécifiques » ont sans doute une définition ambiguë qu'il conviendrait de bien redéfinir afin d'adopter les choix les plus rationnels possibles.

Cependant, l'électricité fait partie d'un « bouquet » énergétique global, et c'est son insertion harmonieuse dans l'ensemble qui doit être considérée. Si les ressources renouvelables sont abondantes (cas de la Norvège avec près de 100% d'hydroélectricité), le chauffage électrique est intéressant. La situation française est, de ce point de vue, particulière puisque une part non négligeable de l'électricité est exploitée pour près de 50% de la production d'eau chaude sanitaire, mais, associée à la tarification heures creuses, elle permet un important stockage d'énergie (entre 50 et 80 GWh par jour, pour comparaison, le barrage de Grand'Maison représente environ 400 GWh) qui contribue à la régulation d'un système fondé sur une production nucléaire peu modulable.

La répartition des usages de l'électricité varie beaucoup d'un pays à l'autre et nous avons choisi de ne considérer brièvement que le cas français. La figure 22 donne l'évolution depuis 1970.

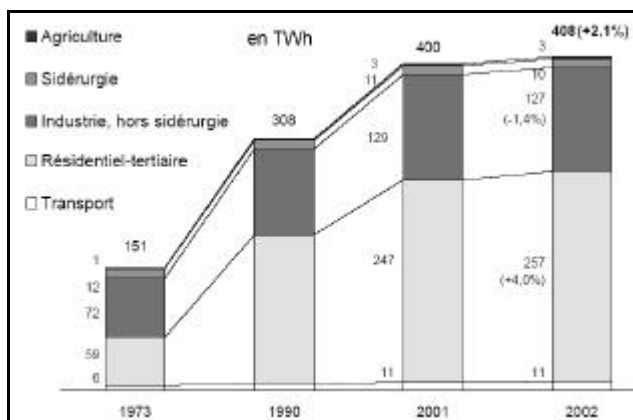


Figure 22 : Evolution de la consommation finale d'énergie électrique française par secteurs d'usage (DGEMP)

La consommation intérieure totale en 2003 a été d'environ 467 10⁹kWh en progression exceptionnelle de 3,9% par rapport à 2002. Cette augmentation trouve une explication dans des conditions climatiques extrêmes en hiver et en été et dans une incitation poussée à la consommation, notamment dans le domaine du chauffage électrique qui continue à progresser. Précédemment, la moyenne annuelle étant d'environ +2%/an. Il serait pourtant aisé de consommer beaucoup moins, mais l'ouverture des marchés ne va sans doute pas aider...

V- Contribution des ressources renouvelables

V-1- Énergie primaire

Nous avons vu, au chapitre III, que les ressources renouvelables contribuent faiblement au bilan mondial de la consommation d'énergie primaire (moins de 20%). Les pays industrialisés sont les plus « énergivores » mais avec le plus faible taux de renouvelables. Les prises de conscience environnementales mais également les inquiétudes économiques les ont conduits à accroître leur indépendance énergétique en faisant appel aux abondantes ressources renouvelables. En somme, nous n'y avons pas eu recours plus tôt sans doute pour des raisons liées à la facilité et à une centralisation justifiée par les contraintes d'une époque. Aujourd'hui, les technologies disponibles permet de décentraliser beaucoup plus aisément et de mieux exploiter des ressources par nature souvent diffuses.

L'Union Européenne (UE) a pris l'engagement, consécutivement aux accords de Kyoto, de faire passer à 11,5% la proportion des renouvelables dans son approvisionnement énergétique global. En 2002, nous n'en étions qu'à 5,08% soit 81 Mtep et il est hautement probable que nous repoussions l'échéance de l'objectif à 2020... La figure 23, issue du baromètre Observ'ER 2003, montre la répartition des ressources contribuant à la fourniture de ces 81 Mtep, le bois et l'électricité hydraulique y représentent 87%.

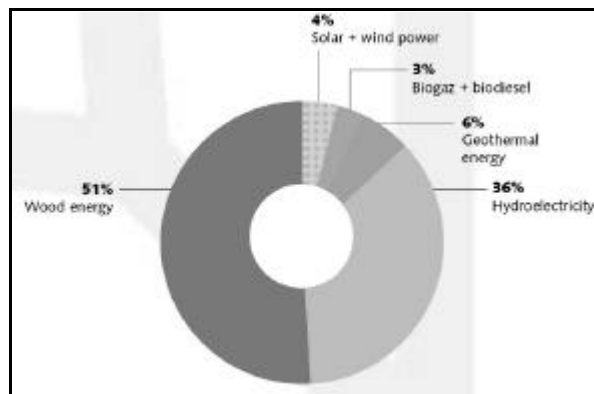


Figure 23 : Répartition des 81 Mtep primaires d'origine renouvelable en 2002 dans l'UE [BaroEuro_03]

La figure 24 met en évidence la production d'énergie renouvelable en France, hydroélectricité comprise. Grâce à l'hydroélectricité et à la biomasse (bois surtout), la France est le premier pays producteur d'énergies renouvelables en Europe devant la Suède. Dans la catégorie « autres », on trouve notamment la chaleur géothermique (0,14 Mtep), celle produite par les pompes à chaleur, les chauffages solaires, l'électricité éolienne, la cogénération à partir de déchets urbains (1,8 Mtep), du biogaz... En fait, la France est très avantagée et son potentiel est très loin d'être totalement exploité.

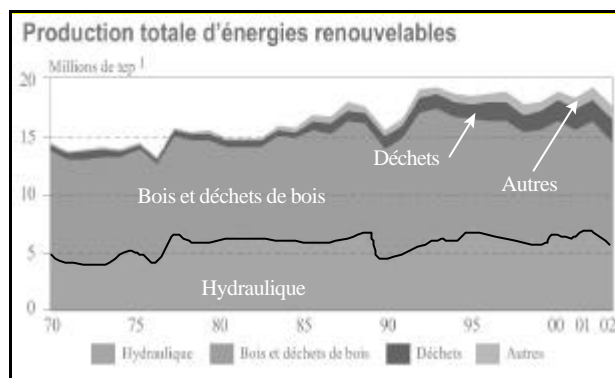


Figure 24 : Evolution de la production française d'énergie d'origine renouvelable [DGEMP_03]

Les ressources qui sont sans doute les plus à développer concernent la production de chaleur basse température dans les secteurs résidentiels et tertiaires qui représentent une grande part de notre action perturbatrice. Le potentiel du chauffage solaire (eau sanitaire et locaux) et de la géothermie (basse ou très basse énergie avec pompes à chaleur) est en effet énorme. Alors, l'électricité utilisée pour alimenter pompes, compresseurs, systèmes de régulation... constitue un usage particulièrement pertinent.

Les transports, complètement dépendants des carburants, peuvent avantageusement brûler des biocarburants. Dans l'UE, ceux-ci entrent actuellement à hauteur de moins de 1% dans l'ensemble des carburants mais leur croissance est très rapide. Les objectifs de 5,75% en 2010 ne seront pas atteints mais on espère près de 4% [BaroEuro_03]. Un jour, ils pourraient consommer de l'hydrogène d'origine renouvelable, mais il faudra encore attendre quelques décennies.

V-2- Pénétration de l'électricité d'origine renouvelable

Au niveau mondial, la production d'électricité consomme environ le tiers de l'énergie primaire mondiale et à peine plus de 20% de la production est d'origine renouvelable (3000 TWh environ).

Dans l'UE, sur les 2560 TWh électriques produits en 2000, 368 TWh étaient d'origine renouvelable (soit 14,4%), leur répartition selon les sources est donnée à la figure 25 [BaroEuro_02].

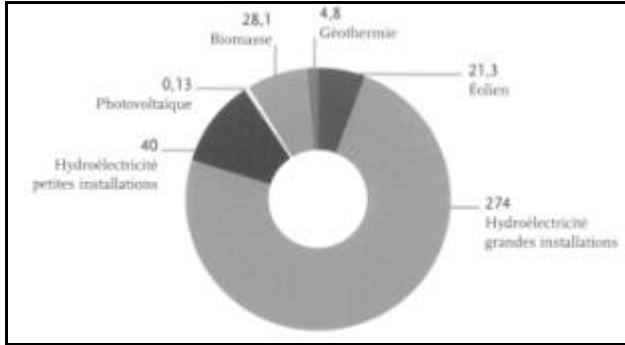


Figure 25 : UE en 2000 : parts des ressources pour la production d'électricité d'origine renouvelable [BaroEuro_02]

Le livre blanc communautaire [CEE_LivreBlanc] en matière d'énergie a émis le souhait d'un passage à 655 TWh renouvelables en 2010 sur un total envisagé de 2850 TWh soit une part de 23%. Sur ces 655 TWh, l'éolien devrait contribuer à hauteur de 80 TWh avec une puissance installée de 40 GW.

La figure 26 montre le taux de production d'électricité renouvelable des pays de l'UE en 2002 et leurs engagements pour 2010.

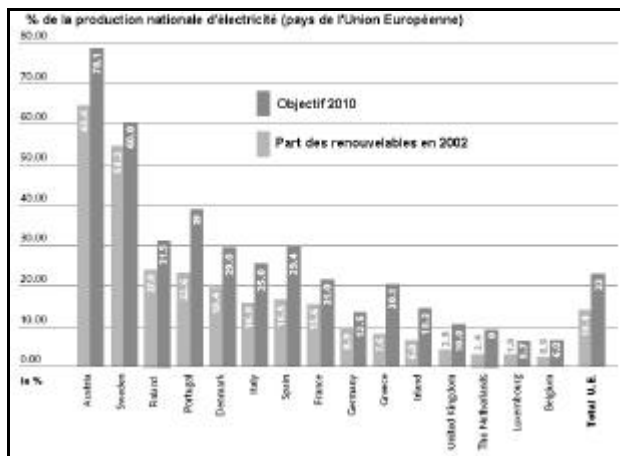


Figure 26 : Part de la production d'électricité renouvelable dans les pays de l'UE en 2002 et objectifs 2010 [BaroEuro_02]

Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne (figure 27) subit de très loin le plus fort taux de croissance depuis plus de 10 ans et cela devrait continuer pendant les 20 prochaines années. Ainsi l'aérogénération devrait constituer la plus grande contribution à la réduction de l'effet de serre durant les prochaines décennies.

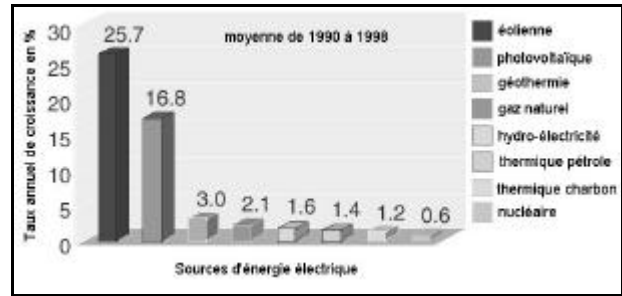


Figure 27 : Taux de croissance des différentes sources d'énergie électrique, moyenne entre 1990 et 1998 (IEEE Power & Energy Mag. 2003 [Rah_03])

Quant aux coûts de production de ces « nouveaux » moyens, comme le montre la figure 28, ils ont considérablement baissé et continueront de le faire jusqu'à ce que les technologies se stabilisent. Si l'on sait un jour prendre en compte tous les coûts environnementaux, il est fort probable que les ressources renouvelables seront les plus compétitives.

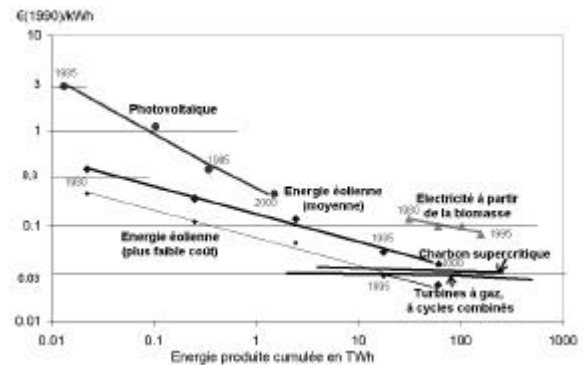


Figure 28 : Courbe de baisse des coûts de production en fonction de l'énergie produite cumulée (données Agence Internationale de l'Énergie)

V-3- Les différentes filières [Mul_03a]

V.3a- Hydraulique

C'est aujourd'hui, et de très loin, la première source renouvelable d'électricité. La puissance installée dans le monde dépasse 750 GW (2001) pour une production annuelle de plus de $2,7 \cdot 10^{12}$ kWh. C'est une solution extrêmement attractive qui est exploitée au voisinage du maximum de son potentiel dans les pays industrialisés. En France, environ 90% des ressources sont utilisées. Au niveau mondial, l'énergie hydraulique pourrait permettre de produire 40 000 TWh.

Dans certains cas géologiquement favorables, des bassins haut et bas permettent d'effectuer un stockage d'énergie en pompant de l'eau puis de la restituer en la turbinant. Ces dispositifs de « stockage hydraulique gravitaire » jouent un rôle essentiel dans la stabilité du réseau. En France, ils ont été construits en complément du dispositif électronucléaire dont la souplesse de réglage est insuffisante pour permettre d'adapter à chaque instant la production à la consommation. D'une façon générale, la présence de barrages hydroélectriques constitue une solution très intéressante pour accumuler l'énergie hydraulique. C'est l'un des meilleurs atouts de cette filière.

V.3b- Solaire thermodynamique

On peut exploiter directement la chaleur rayonnée par le soleil pour chauffer de l'eau et actionner des turbines comme dans les centrales thermiques.

Pour la production à grande échelle, on trouve principalement deux grandes familles de systèmes solaires thermodynamiques. La première exploite des capteurs cylindrico-paraboliques (auges) au fond desquels se trouve un tube parcouru par un fluide caloporteur. Leur axe de rotation nord-sud permet le suivi du soleil d'est en ouest. En Californie, de 1984 à 1991, neuf usines de 13,8 à 80 MW ont été construites et totalisent une puissance de 354 MW. La seconde famille met en œuvre une tour contenant une chaudière vers laquelle est concentré le rayonnement capté par un champ d'héliostats. En France, la centrale Thémis dans les Pyrénées a permis de tester ce principe durant les années 1980 [Bond_89].

Ces centrales peuvent être avantageusement couplées avec un autre mode de chauffage, par exemple au gaz. Le coût de production du kWh peut ainsi devenir plus facilement compétitif et de très nombreux projets sont en préparation dans le monde. On peut considérer que la filière technologique à auges a atteint une bonne maturité industrielle.

Outre ces usines à turbines à vapeur, des dispositifs à effet de cheminée ont été testés (Espagne) et sont envisagés pour une production à grande échelle. Ils sont fondés sur le chauffage, via un capteur thermique situé au niveau du sol, de l'air ambiant qui se trouve ensuite naturellement aspiré dans une cheminée très haute. Des aérogénérateurs sont interposés dans le courant d'air et produisent de l'électricité (projet australien d'immenses usines de 200 MW_e).

Enfin, il a également été envisagé d'exploiter l'énergie thermique solaire accumulée dans les mers tropicales (projets OTEC, Ocean Thermal Energy Conversion) [Avery_02]. De nombreux projets d'extraction de cette « énergie thermique des mers » ont été menés en mettant en œuvre des machines thermodynamiques fonctionnant sur la faible différence de température (10 à 20°C) existant entre surface et profondeur (environ 1000 m).

V.3c- Solaire photovoltaïque

La conversion photovoltaïque (PV) présente l'immense avantage d'être complètement statique et par conséquent d'une excellente fiabilité et d'une faible maintenance. Les cellules au silicium cristallin dominent actuellement le marché, mais d'autres technologies notamment en couches minces vont probablement émerger. Mais le coût des générateurs PV est encore très élevé, sachant que la durée d'ensoleillement équivalente à pleine puissance (1 kW/m²) est comprise entre 1000 et 2000h, le prix de revient du kWh PV est parmi les plus élevés. Il devrait cependant baisser suffisamment pour qu'à l'horizon 2030/50, cette technologie contribue significativement à la production d'électricité. Les différents programmes (Japon, Allemagne, USA...) de toits solaires ont ainsi permis d'accélérer la courbe d'apprentissage et la baisse des coûts, alors qu'avant la fin des années 90, l'essentiel du marché se trouvait dans les applications non raccordées au réseau.

Il y a peu d'installations à grande échelle. En Italie, une usine de 3,3 MW produit 4,6 GWh annuels sur le site de Serre et fin 2002, c'est en Bavière que 2 centrales (1,7 et 4 MW) ont été mises en service pour un coût d'investissement d'environ 4,4 €/W, au lieu de 6 dans les installations de toits solaires. A ce niveau de puissance, on a pu bénéficier des effets d'échelle sur le prix des convertisseurs raccordés au réseau.

Fin 2002, la puissance photovoltaïque installée (systèmes connectés ou non au réseau) dans le monde atteignait environ 2 GW.

V.3d- Aérogénération (éoliennes) [Obser_Jan04]

Il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes silencieuses, esthétiques et résistantes aux conditions météorologiques très capricieuses. A un coût d'environ 1 €/W en zone terrestre, la production à grande échelle (actuellement turbines de 400 kW à 4 MW) devient rentable dans les zones suffisamment ventées. Le taux de croissance actuel est de 25% par an.

Fin 2003, plus de 39 GW éoliens étaient installés dans le monde. L'Allemagne reste leader avec 14,6 GW, quant à la France, malgré des programmes incitatifs et l'un des meilleurs potentiels, la filière peine à décoller (253 MW). La durée équivalente de production à pleine puissance est comprise entre 2000 et 4000 heures annuelles selon les sites (terrestres convenablement ventés à offshore). Le potentiel offshore européen est estimé à plus de 3 10¹² kWh/an, soit presque le double de la consommation européenne d'électricité. C'est d'ailleurs dans ce domaine que les installations vont maintenant s'étendre. Les premières expériences de fermes offshore datent de 1990, fin 2003, ce sont 540 MW qui étaient en service, dont 400 MW au Danemark, leader industriel. Le Royaume Uni prévoit entre 5 et 7 GW en 2010.

V.3e- Houlo-générateurs

La houle représente un immense gisement d'énergie, cependant le milieu marin est relativement hostile (tempêtes, corrosion). Les puissances disponibles s'expriment par unité de longueur de front de vague et atteignent quelques 10 kW/m. La puissance moyenne annuelle sur les côtes de la façade Atlantique est comprise entre 15 et 80 kW/m [Clé_02]. Des recherches sur des générateurs électromécaniques utilisant le mouvement ondulatoire de l'eau ont été menées, de nombreuses expériences existent et plusieurs prototypes ont été testés à des niveaux de puissance allant jusqu'au MW.

V.3f- Électricité géothermique

La géothermie haute énergie (150 à 350°C) permet de produire de l'électricité en transformant de l'eau en vapeur ou en utilisant directement la vapeur sous pression. La puissance mondiale installée était, en 2000 d'un peu plus de 8 GW électriques pour une production totale d'environ 50 10⁹ kWh.

En Guadeloupe, l'usine de Bouillante, mise en service en 1985, possède une capacité de 4,2 MW qui doit croître à 20 MW prochainement (production annuelle attendue de 0,16 10⁹ kWh).

L'Italie dispose d'une capacité de production de 790 MW pour 4,7 10⁹ kWh annuels (1,6% de sa production totale d'électricité) dont une centrale de

grande puissance (Valle Secolo, 1991) comprenant 2 groupes de 60 MW.

La technologie des « roches chaudes sèches » fait l'objet de travaux de recherche en Europe (en Alsace à Soultz sous Forêts) avec un puits à 3600 m. Elle est fondée sur l'injection d'eau dans des zones profondes de roches fracturées et permettrait d'utiliser de nombreux sites jusqu'à maintenant inexploitable par les techniques classiques.

V.3g- Exploitation des courants marins

La technique la plus connue est celle des usines marémotrices qui nécessitent la construction d'un barrage. Celle de la Rance [Ban_97] (24 groupes de 10 MW) produit annuellement 540.10⁶kWh soit environ 91% de l'énergie électrique marémotrice mondiale. Elle reste en effet l'une des seules usines marémotrices au monde de taille industrielle. D'autres projets ont fait l'objet d'étude (Canada : Fundy Bay 5300 MW, UK : Severn 8640 MW), mais ils ne verront sans doute pas le jour pour des raisons d'acceptabilité.

Actuellement, on considère qu'il est préférable d'implanter des turbines sous-marines et d'exploiter directement les courants marins comme on le ferait avec des éoliennes. Le potentiel, difficilement estimable, est évalué à plusieurs centaines de TWh annuels pour les seules côtes européennes. Pour exemple, l'entreprise norvégienne Hammerfest Strøm AS envisage un parc de 15 000 éoliennes sous-marines entraînées par les courants à proximité des côtes de Norvège avec un potentiel de production de 450 TWh (60 sites sélectionnés le long du littoral norvégien).

V.3- Cogénération à partir de la biomasse ou de déchets

La cogénération consiste à valoriser la chaleur habituellement perdue lors de la conversion mécanique dans une machine thermodynamique destinée à fabriquer de l'électricité. On peut ainsi brûler des produits issus de la photosynthèse (bois, bagasse...) ou en extraire un combustible de meilleure qualité (biogaz : méthane, méthanol) dans des usines spécialisées. Aux USA, plus de 350 usines totalisent une production supérieure à 7000 MWe. A grande échelle, on peut utiliser des turbines à vapeur et, à petite échelle, des moteurs à combustion interne.

Les ordures ménagères représentent également une source d'énergie intéressante. Dans les pays industrialisés, l'incinération d'une tonne d'ordures ménagères permet de produire 300 à 500 kWh. Le gaz de décharge représente également un gisement très intéressant.

Les cogénérateurs de petite puissance pourraient devenir les chaudières de demain en produisant électricité et chaleur pour l'habitat.

V.4- Indispensable stockage de l'énergie

Hormis les carburants issus de la biomasse et la chaleur géothermique qui diffuse régulièrement, les autres ressources renouvelables présentent un inconvénient majeur : leur fluctuation indépendamment de la demande.

Que ce soit pour exploiter la chaleur rayonnée par le soleil, l'électricité PV ou éolienne, un stockage d'énergie se révèle indispensable.

Comme cela a été le cas, en d'autres temps, pour la mise en place du système électronucléaire, qui est peu modulable, il est nécessaire aujourd'hui de songer à investir dans des moyens de stockage. Mais alors de nombreuses questions se posent, notamment dans le nouveau contexte d'ouverture des marchés. L'une d'elles est « où faut-il stocker ? » Les solutions d'accumulateur ne manquent pas, mais elles sont toutes coûteuses, dissipent de l'énergie lors des opérations d'échange et s'usent au cours des cycles de charge décharge. C'est en tout cas l'un des points cruciaux du développement des systèmes de production électrique du futur. La figure 29 montre schématiquement comment pourraient être constitués, dans un futur proche, les réseaux électriques. Ils intégreraient les anciennes usines centralisées et tous les nouveaux acteurs décentralisés ou dispersés munis de moyens de stockage, par conséquent également décentralisés. Un tel système permettrait une réelle pénétration des ressources renouvelables sans mettre en danger la stabilité du réseau et en offrant la possibilité d'ilotage des producteurs décentralisés équipés d'accumulateurs, conférant ainsi au système une quasi invulnérabilité.

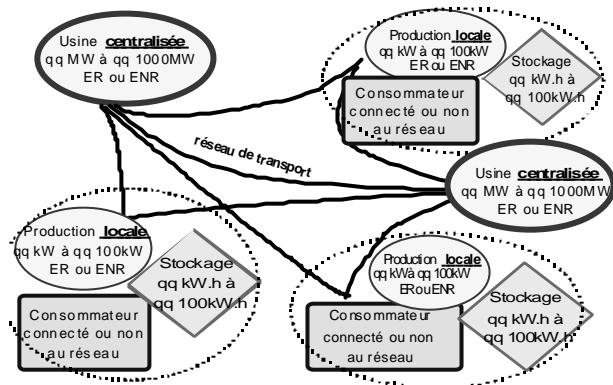


Figure 29 : Systèmes de productions centralisée et décentralisée en réseau (ER = Énergies renouvel., ENR = Énergies Non Renouv.).

VI- Conclusion, propositions.

Les menaces du changement climatique et d'épuisement de nos ressources (non renouvelables) de carburants fossiles et d'uranium pèsent de plus en plus sur l'économie, la stabilité politique de nos pays et sur le comportement des citoyens.

Parallèlement, la nature nous offre suffisamment d'énergie pour satisfaire la totalité de nos besoins mais de façon diffuse et souvent fluctuante, alors que nous avons pris l'habitude de centraliser une partie de notre production d'énergie : tout particulièrement celle d'électricité. Comme la chaleur se transporte mal, il n'y a pas de réseaux de chaleur sur de longues distances et la chaleur a conservé des modes de production décentralisés sur le lieu de consommation. Enfin, il faut dire et redire que le stockage est indispensable pour accompagner la bonne utilisation des ressources renouvelables, que ce soit pour la chaleur, le froid ou l'électricité. Bien sûr, il a un coût...

Il est temps de repenser complètement nos modes de production et de consommation d'énergie. En terme de consommation, le temps de retour sur investissement d'un

système plus économe est souvent très court et on peut affirmer qu'économiser 1 kWh coûte moins cher que de le produire !

On reproche parfois le faible rendement de conversion de certains systèmes de production à partir des ressources renouvelables (cas de la génération photovoltaïque par exemple). En fait, le problème n'est pas là. Lorsqu'on exploite des ressources abondantes et renouvelables. Les questions qui doivent être posées sont :

- l'énergie qui doit être dépensée pour fabriquer puis recycler ce système sera-t-elle largement compensée par la production durant sa vie ?

- le faible rendement ne se traduit-il pas par un surcoût d'investissement inacceptable ?

- etc...

Dans tous les cas évoqués précédemment, génération PV comprise, le bilan énergétique global est largement positif et les recherches sont orientées vers son amélioration. Un faible rendement peut parfois être gage d'un moindre impact sur l'environnement !

On ne pourrait clore le sujet sans évoquer l'hydrogène, carburant propre par excellence, à condition qu'il soit produit proprement, il pourrait constituer un vecteur d'énergie idéalement complémentaire de l'électricité, notamment dans les transports. Mais l'hydrogène est encore loin d'être un simple carburant commercial, des développements importants doivent également être menés pour améliorer son stockage et son transport.

Le développement durable, tel que nous pouvons l'entendre aussi bien du point de vue sociétal qu'environnemental, passera sans aucun doute par l'utilisation massive des ressources renouvelables. Même si elles ne sont pas exemptes de perturbations environnementales (rien n'est gratuit, lorsque l'on manipule l'énergie), elles sont certainement les seules à être exploitables pour très longtemps avec des moyens actuellement disponibles et opérationnels. Alors pourquoi attendre ?

Les transitions, pour qu'elles soient acceptées et réalisables, doivent être « douces ». Il faut donc élaborer des scénarii d'évolution sur de longues durées (au moins 50 ans). Abandonner brutalement l'électricité nucléaire serait d'ailleurs sans doute très risqué. Notre sécurité réside en effet dans la diversité et il est indispensable de multiplier les ressources. Enfin, n'oublions pas qu'être totalement dépendants de la nature peut être dangereux, particulièrement en cas de catastrophes climatiques graves. Il n'est donc pas inutile de chercher également en direction de la fusion nucléaire.

VII- Bibliographie

[Avery_02] W. H. AVERY, "Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)", Encyclopedia of Physical Science and Technology, Vol 11, 2002, pp. 123-160.

[Ban_97] M. BANAL, « L'énergie marémotrice », REE n°8, sept.97, pp.6-7.

[BaroEuro_02] Eurobserv'ER, « Le baromètre européen des énergies renouvelables », bilan octobre 2000/février 2002. Editions Systèmes Solaires.

[BaroEuro_03] Eurobserv'ER, « Le baromètre Européen 2003 des énergies renouvelables », chiffres 2002, 3^{ème} bilan, Editions Systèmes Solaires. Téléchargeable sur : www.energies-renouvelables.org

[Bon_89] B. BONDUELLE, B. IVOIRE, A. FERRIERE, « La centrale expérimentale Thémis : bilan et perspectives », Revue de Phys. Appl., avril 1989, pp.453-461.

[Brow_01] L.R. BROWN, « Éco-Économie. Une autre croissance est possible, écologique et durable », Seuil 2003 (Ed. orig. « Eco-Economy. Building an Economy for the Earth », W.W. Norton & Comp. Ltd. N.Y. 2001). Entièrement téléchargeable sur: www.earth-policy.org

[Brund_97] G.H. BRUNDTLAND, « Our Common Future. », Report for the World Commission on Environment and Development (ONU) Oxford University Press 1987.

[CEA_01] CEA, « Uranium : l'abondance au rendez-vous », Les déficits du CEA n°94, dec-janv. 2002, pp.4-5.

[CEE_LivreBlanc] Commission Européenne « Énergie pour l'avenir : les sources d'énergie renouvelables. Livre blanc établissant une stratégie et un plan d'action communautaires ».

[Chab_97] B. CHABOT, « Énergies renouvelables » Encyclopaedia Universalis 1997.

[Clé_02] A. CLÉMENT et al. « Wave energy in Europe : current status and perspectives », Renewable and Sustainable Energy Reviews, Pergamon, 6 (2002), pp.405-431.

[Comb_01] M. COMBARNOUS, « Les biomasses végétales et animales », Ecole d'été de physique IN2P3, Caen, août 2001.

[Cre_96] P. CREOLA, « Space and the Fate of Humanity », Symp. Space of service to Humanity, 5-7 feb. 96, Strasbourg., pp.3-14.

[Darl_03] DARLY (association) et FNAUT « Etude ressources énergétiques et transports », sept. 2003.

[DGEMP_03] DGEMP, « L'Énergie en France- Repères », Édition 2003, Chiffres clés, Ministère de l'Économie des Finances et de l'Industrie.

[EnPlus_02] Énergie Plus, « Comment capter et stocker le gaz carbonique », supplément n°284 15 avril 2002, pp.34-37.

[IEA_03a] Intern. Energy Agency, « Renewables Information », IEA Statistics, 2003, 200p.

[IEA_03b] Intern. Energy Agency, « Key World Energy Statistics », 2003, 78p. <http://www.iea.org>

[Joha_02] Rapport du Sommet mondial pour le développement durable, ONU, Johannesburg (Afrique du Sud), 26 août-4 septembre 2002. (Téléchargeable).

[Jacq_95] A. JACQUARD, « J'accuse l'économie triomphante », Calmann-Lévy 1995 (aussi édité au Livre de Poche)

[Lah_00a] J. LAHERRÈRE, « Quelles énergies en 2020 et quelles incertitudes ? », Revue Géologues n°124, 03-2000. Téléchargeable sur <http://www.cifeg.org/>

[Laher_00b] J. LAHERRÈRE, « Vers un Déclin de la Production Pétrolière », colloque Energie et développement durable, 11 octobre 2000.

[Laher_03] J. LAHERRÈRE, « How to estimate future oil supply and oil demand ? », Internat. Conf. on Oil Demand, Production and Costs - Prospects for the Future. Copenhagen, 2003 December 10. <http://www.oilcrisis.com/laherrere/>

[Lau_04] M.H. LAURENT et G. SALAÜN, « La demande mondiale d'énergie sur le long terme », Revue 3EI, n°36, mars 2004.

[Mul-98] B. MULTON, « L'énergie sur la terre : analyse des ressources et de la consommation. La place de l'énergie électrique. », Revue 3E.I n°13, septembre 98, pp.29-38.

[Mul_99] B. MULTON « L'énergie électrique : analyse des ressources et de la production. », Journées électrotech. du club EEA, 28-29 janvier 1999, Paris, 8 p.

[Mul_03a] B. MULTON, « Production d'électricité par des sources renouvelables », Techniques de l'Ingénieur, Traités de Génie Electrique, D4005/6, mai 2003.

[Mul_03b] B. MULTON, O. GERGAUD, G. ROBIN, H. BEN AHMED, « Ressources énergétiques et consommation humaine d'énergie », Techniques de l'Ingénieur, D3900, novembre 2003.

[Mul03c] B. MULTON, J. RUER, « Stocker l'électricité: oui, c'est indispensable et c'est possible. Pourquoi, où, comment ? », Publication ECRIN en contribution au débat national sur l'énergie, avril 2003, téléchargeable : <http://www.ecrin.asso.fr/energies/>

[ObsEn_FR02] Observatoire de l'Énergie, « Chiffres clés ; L'énergie », DGEMP, Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, document 2002. www.minefi.gouv.fr

[Obser_Jan04] EurObserv'ER, Le baromètre éolien : 39 294 MW dans le monde début 2004, revue Systèmes Solaires n°140, janvier 2004, pp.55-68.

[Rah_03] S. RAHMAN, « Green power. What is it and where can we find it? », IEEE Power & Energy Magazine, Jan/Feb. 2003, pp.30-37.

[RTE_03] RTE, «Energie électrique en France en 2003, valeurs provisoires », publication du Gestionnaire du réseau de transport d'électricité, 31 déc. 2003.

[Tri_03] J. C. TRICHET, « Le vent pourrait étancher la soif énergétique de l'humanité », Energie Plus sup. au n°300, 15 fev03, pp.13-18.

[Web_EDF] site internet d'électricité de France, <http://www.edf.fr/>

[Web_CEA] serveur internet du Commissariat à l'Énergie Atomique, <http://paprika.saclay.cea.fr>.

[Web_EIA] site internet de l'Energy Information Administration du gouvernement US, notamment les rapports annuels « International Energy Outlook » <http://www.eia.doe.gov/>

[Web_IFP] site de l'Institut Français du Pétrole, <http://www.ifp.fr>

[WWF_02] WWF, M. JENKINS et. al. « Living Planet Report 2002 » ou «Rapport 2002 planète vivante », June 2002. Téléchargeable sur internet.

Voir aussi documents (pédagogiques, recherche et vulgarisation) en téléchargement (stockage, éolien...) : www.bretagne.ens-cachan.fr rubriques recherche et département de mécatronique.

Organismes d'information sur l'Énergie :

Conseil Mondial de l'Énergie (World Energy Council) : <http://www.worldenergy.org/wec-geis/>

Agence Internationale de l'Énergie (International Energy Agency) : <http://www.iea.org>

Energy Information Administration :

<http://www.eia.doe.gov/>

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) : <http://www.ademe.fr>

Electricité de France (EDF) : <http://www.edf.fr/>

Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) :

<http://www.cea.fr/>

Comité de liaison Energies Renouvelables (CLER) :

<http://www.cler.org>

Institut Français du Pétrole (IFP) : <http://www.ifp.fr>

Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières (DGEMP, Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie) : <http://www.industrie.gouv.fr>

Institut de l'Énergie et de l'environnement de la Francophonie (IEPF) : <http://www.iepf.org/>

Observateur des Énergies Renouvelables (Observ'ER), revues Systèmes Solaires et Renewable Energy Journal : <http://energies-renouvelables.org>

ENERGIE PLUS : <http://www.energie-plus.com/>

CIELE: Centre d'Information sur l'Énergie et l'Environnement : <http://www.ciele.org/>

VIII- Équivalences énergétiques

Équivalences entre les unités les plus courantes :

1 Wh = 3600 J (1 10 ⁹ kWh = 10 ¹² Wh, 1 EJ = 10 ¹⁸ J)
1 t.e.p. ≅ 11 600 kWh (tonne équivalent pétrole)
1 baril (159 l ou 136 kg) ≅ 1700 kWh
1 BTU (British Thermal Unit) ≅ 252 cal ≅ 1050 J
1 quad BTU : 10 ¹⁵ BTU = 290.10 ⁹ kWh

Les valeurs énergétiques PCI (pouvoir calorifique inférieur ou chaleur dégagée par fission dans le cas de l'uranium) moyennes, des principaux combustibles, sont données ci-dessous :

hydrogène	gaz naturel	GPL	charbon
34 kWh/kg	17 kWh/kg 11 à 12 kWh/m ³	19,7 kWh/kg	7,2 kWh/kg

fuel	essence	bois	uranium naturel
11,6 kWh/kg	12 kWh/kg	2 à 4 kWh/kg	120.10 ³ kWh/kg

Influence de l'activité humaine sur les changements climatiques

Gérard MÉGIE^{1,2} et Jean JOUZEL²

1) Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie

2) Institut Pierre Simon Laplace

1 Introduction

Depuis sa formation au sein du système solaire, voilà environ quatre milliards et demi d'années, la Terre a continuellement évolué à l'échelle des temps géologiques. Ces évolutions, qui ont concerné tous les compartiments de notre planète - continents, océans, biosphère - ont conduit, par étapes successives, à l'apparition de la vie, distinguant ainsi la Terre des autres planètes du système solaire. Jusqu'au début du vingtième siècle, elles ont trouvé leur origine dans des phénomènes naturels, liés en particulier aux variations de l'orbite et de l'inclinaison de la Terre dans sa course autour du soleil. Mais, l'explosion démographique, le développement des activités industrielles et agricoles, la multiplication des moyens de transport ont entraîné, au cours du dernier siècle, des changements profonds de notre environnement qui affectent l'ensemble de la planète.

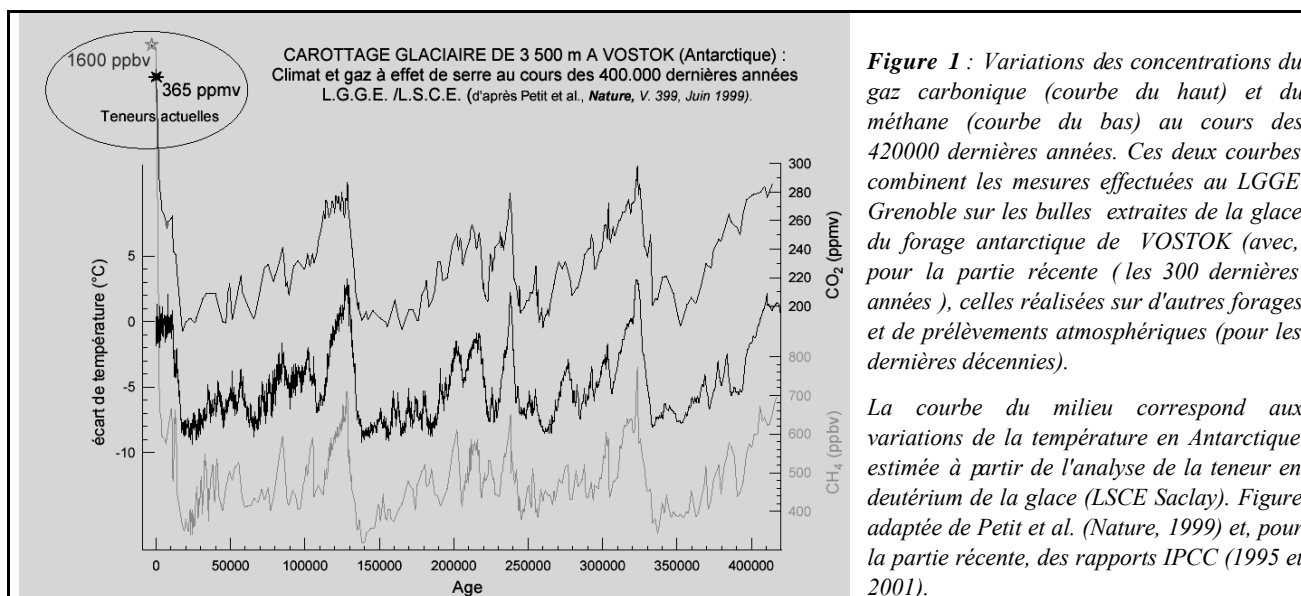
La planète Terre se caractérise par la présence de plusieurs compartiments qui tous conditionnent aujourd'hui l'équilibre de la vie : continents, océans, biosphère terrestre et biosphère marine, atmosphère. Cette dernière, que l'on peut identifier par la présence des nuages et par sa couleur bleue liée à la diffusion de la lumière solaire, est une enveloppe extrêmement ténue dont l'extension verticale n'est que de quelques dizaines de kilomètres. Elle est donc particulièrement fragile, d'autant que sa composition chimique reflète pour une large part les émissions naturelles et anthropiques à la surface de la Terre. Ainsi, outre l'azote qui représente les 4/5 de l'abondance totale, la présence de l'oxygène, autre constituant majoritaire de cette atmosphère, résulte directement de l'équilibre entre la photosynthèse et la respiration. La présence de l'eau sous ses différentes formes est une autre caractéristique essentielle de cet équilibre de la planète Terre : liquide dans les océans, liquide ou solide dans les nuages, enfin sous forme de vapeur dans l'atmosphère où elle ne représente d'ailleurs qu'un très faible pourcentage de l'abondance totale, quelques % dans les zones humides et moins d'un millième dans les régions sèches.

Mais il existe également dans l'atmosphère terrestre d'autres gaz, en quantités relativement faibles, tels que le dioxyde de carbone ou gaz carbonique (365 millièmes ou parties par million – ppm), le méthane (1.8 ppm), l'oxyde nitreux (0.31 ppm) et l'ozone (0.05 ppm au voisinage de la surface, 4 à 6 ppm dans la stratosphère entre 20 et 40 km d'altitude), qui eux aussi jouent un rôle fondamental dans l'équilibre énergétique de la Terre, et donc dans celui de la vie. D'une part ils filtrent le rayonnement solaire incident – c'est principalement le rôle de l'ozone dans la stratosphère terrestre qui empêche ainsi la pénétration jusqu'au sol d'un rayonnement ultraviolet solaire qui détruirait les molécules constitutives de la matière vivante - et d'autre part ils absorbent une partie du rayonnement qui est émis par la surface de la Terre dans le domaine des longueurs d'onde infrarouges et le renvoient partiellement vers cette même surface. Ils contribuent ainsi à apporter un surplus d'énergie thermique qui permet de maintenir la température moyenne de la planète à la valeur de 15°C que nous connaissons aujourd'hui. Si cet effet de serre naturel n'existait pas, la température de la Terre serait de -18°C et l'eau liquide n'aurait pas pu se maintenir à sa surface. C'est d'ailleurs ce qui est vraisemblablement arrivé sur la planète Mars, plus éloignée du soleil et donc plus froide. Sur Terre, cet effet de serre est dû pour les 2/3 à la vapeur d'eau et pour 1/3 au dioxyde de carbone. Il convient donc de remarquer que ni l'oxygène moléculaire ni l'azote moléculaire, constituants les plus abondants de l'atmosphère, ne jouent de rôle dans ce mécanisme, dans la mesure où leurs structures moléculaires ne leur confèrent pas de propriétés d'absorption dans le domaine des longueurs d'onde infrarouges. Enfin, à tous ces composés présents naturellement dans notre atmosphère, se sont récemment ajoutés d'autres gaz à effet de serre comme les chlorofluorocarbures, mis en cause dans la destruction de l'ozone stratosphérique, et qui étaient principalement utilisés dans l'industrie du froid.

2 L'équilibre dynamique de la planète Terre modifié par les activités humaines

Pour mieux apprécier les perturbations de l'équilibre énergétique de la Terre potentiellement attribuées aux activités humaines, il est intéressant de revenir sur l'histoire de notre planète, notamment au cours des 400 000 dernières années, période pour laquelle nous disposons de données précises sur les équilibres climatiques. Celles-ci proviennent des archives que constituent les glaces polaires, en particulier celles accumulées au centre du continent Antarctique où leur épaisseur dépasse plusieurs kilomètres. En effet, lors du

mécanisme de cristallisation qui donne naissance à la glace, de petites bulles d'air sont emprisonnées qui portent le témoignage de la composition de l'atmosphère à l'époque de leur formation. En extrayant des carottes de glace de plus de 3 kilomètres de longueur, ce qui représente à peu près l'épaisseur totale de la calotte glaciaire sur le continent Antarctique, les paléoclimatologues peuvent aujourd'hui restituer les variations de température et de concentrations des constituants minoritaires de l'atmosphère au cours des dernières centaines de milliers d'années.



L'analyse de ces données du passé nous montre que les climats de la Terre répondent aux variations de l'énergie qui parvient à sa surface en provenance du Soleil. Celle-ci subit des oscillations liées aux paramètres cosmiques de l'orbite et de la position de la Terre dans sa course autour du soleil. Elles sont caractérisées par des périodes récurrentes proches de 20 000, 40 000 et 100 000 ans et se traduisent par l'alternance de périodes froides, les âges glaciaires, et d'optima climatiques pendant les périodes interglaciaires. Les variations de température reflètent ces oscillations et l'on passe ainsi, en remontant le temps, de la période actuelle interglaciaire à un âge glaciaire voici 20 000 ans. Puis, on retrouve de nouveaux âges interglaciaires voici 120 000, 240 000 et 330000 ans, séparés par des périodes glaciaires pendant lesquelles les températures moyennes sont jusqu'à 5 à 6°C plus froides. La surface de la Terre est alors profondément modifiée, notamment dans les régions de haute et moyenne latitudes de l'hémisphère nord, où une gigantesque calotte glaciaire apparaît. L'eau liquide s'accumule dans ces calottes et le niveau moyen des mers est inférieur de 100 mètres environ par rapport à sa valeur actuelle. En ce qui concerne l'atmosphère, le dosage du gaz carbonique et du méthane contenus dans les archives glaciaires montre que les teneurs de ces gaz dans l'atmosphère varient également en fonction des oscillations climatiques (Figure 1). Celles-

ci sont plus faibles pendant les périodes glaciaires, avec des valeurs de 200 ppm pour le gaz carbonique et de 0.4 ppm pour le méthane. Mais, on constate également que jamais au cours des 400 000 dernières années la teneur en gaz carbonique n'a dépassé 300 ppm, jamais celle en méthane n'a dépassé 0.8 ppm.

Or, depuis un peu plus de deux siècles, la concentration des gaz à effet de serre, autres que la vapeur d'eau, augmente rapidement dans l'atmosphère en réponse aux activités humaines. La teneur en dioxyde de carbone, aujourd'hui de 365 ppm, a augmenté de 30 % et ce pour les trois quarts à cause de l'utilisation des combustibles fossiles. Celle du méthane a plus que doublé au cours des 300 dernières années pour atteindre près de 1.8 ppm essentiellement à cause de l'intensification de l'agriculture qui, à travers l'utilisation des engrais azotés, est aussi partiellement responsable de l'augmentation de près de 20% de l'oxyde nitreux (0.31 ppm). L'évolution de la teneur en gaz carbonique au cours des 30 000 dernières années illustre parfaitement l'ampleur et surtout la rapidité de cette perturbation. Alors que le passage de la teneur de 200 ppm, observée pendant la dernière ère glaciaire à la valeur interglaciaire de 280 ppm s'est faite en quelques milliers d'années, la perturbation due aux activités humaines depuis le début du dix neuvième siècle, qui est du même ordre de grandeur, s'est produite en moins de 200 ans. Il s'agit donc d'une variation extrêmement

rapide à l'échelle des évolutions naturelles (Figure 1) qui confirme que les activités humaines modifient fortement les teneurs en gaz carbonique et autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Au-delà de la concentration de ces différents gaz dans l'atmosphère, il faut également prendre en compte leur capacité à absorber le rayonnement infrarouge et à le renvoyer vers la surface terrestre. Or, celle-ci dépend de la structure des molécules. Ainsi, si l'on met dans l'atmosphère la même masse de méthane et de gaz carbonique, le pouvoir de réchauffement du méthane sera 56 fois supérieur à celui du CO₂. Dans le cas de l'oxyde nitreux, le facteur est de 280. Il est de 1 200 pour l'ozone de la basse atmosphère. D'autres gaz à effet de serre comme les chlorofluorocarbures, mis en cause dans la destruction de l'ozone stratosphérique, et qui étaient principalement utilisés dans l'industrie du froid, ont, à masse égale, un pouvoir de réchauffement entre 5 000 et 10 000 fois supérieur à celui du gaz carbonique. Heureusement, leur concentration dans l'atmosphère reste beaucoup plus faible, de l'ordre de 0.004 ppm. Lorsque l'on considère l'effet global des différents constituants, on constate que tous jouent un rôle non négligeable dans l'effet de serre additionnel (que nous désignerons également par la suite sous le terme de « forçage radiatif »). L'énergie utilisable en moyenne pour chauffer les basses couches de l'atmosphère qui était proche de 240 Wm⁻² a augmenté de 2,43 Wm⁻² depuis 1750, soit d'environ 1%. Si le gaz carbonique contribue pour 60% à cette augmentation, les parts relatives du méthane, des chlorofluorocarbures et de l'oxyde nitreux sont respectivement de 20 %, 14 % et 6 %. Toutefois, une autre variable joue un rôle important dans la comparaison des différents gaz à effet de serre. Il s'agit des temps pendant lesquels ceux-ci restent dans l'atmosphère avant de disparaître ou d'être échangés avec d'autres compartiments de l'environnement. On comprend en effet que plus un gaz restera dans l'atmosphère, plus il aura la capacité d'exercer son pouvoir de réchauffement. Le gaz carbonique a ainsi un temps moyen de résidence compris entre 1 et 2 siècles. Son impact sur l'environnement sera donc plus important que celui du méthane dont la durée de vie n'est que de 10 ans. En revanche, une action de réduction des concentrations sera plus efficace à court terme sur ce dernier, ce qui peut présenter un avantage dans la mise en oeuvre des stratégies de réduction des gaz à effet de serre.

Le cas de l'ozone, non pris en compte dans le bilan ci-dessus, est particulièrement intéressant. D'une part, l'introduction par l'homme des chlorofluorocarbures a provoqué une diminution de la quantité d'ozone dans la stratosphère et donc une diminution, estimée à 0,15 Wm⁻² entre 1979 et 2000, de l'effet de serre qui lui est associé ; l'ozone étant un gaz très réactif qu'on ne peut pas retrouver dans les archives glaciaires, il n'est pas possible de proposer une estimation qui remonte plus loin dans le passé. D'autre part, les variations de l'ozone dans la stratosphère, dont le suivi à partir de l'analyse des concentrations relatives d'ozone dans l'air au voisinage de la surface remonte à environ un siècle et demi, illustrent le couplage entre le changement

climatique et la qualité de l'air. Elles sont fondées sur des mesures chimiques, qui montrent que dans les années 1880-1900, les teneurs en ozone ne dépassaient pas 10 à 15 milliardièmes (ou ppb) aussi bien dans des sites proches des villes comme le parc Montsouris à Paris, que dans des stations éloignées de toute source de pollution comme le Pic du Midi à 3000 mètres d'altitude. Aujourd'hui, les teneurs mesurées sur ce site sont de l'ordre de 50 ppb. Elles témoignent donc d'une augmentation de près d'un facteur 4 au cours du vingtième siècle que l'on peut directement relier aux activités humaines. En effet, l'ozone n'est pas un constituant qui sort directement des cheminées d'usines ou des pots d'échappement des voitures. Il se forme dans l'atmosphère par transformation chimique, en présence du rayonnement solaire qui apporte l'énergie nécessaire aux réactions, à partir de divers précurseurs, composés organiques volatiles et hydrocarbures, et de catalyseurs, les oxydes d'azote. Ce processus de formation est d'ailleurs extrêmement sensible à la présence des oxydes d'azote puisqu'il suffit de quelques centièmes de milliardième de ces composés pour déclencher les processus oxydants qui conduisent à la formation d'ozone. Les lieux privilégiés de cette formation sont les grandes agglomérations et les zones industrielles où existe ce mélange d'oxydes d'azote, liés au processus de combustion et au transport, et d'hydrocarbures. L'ozone et ses précurseurs sont également transportés aux échelles régionales et continentales, loin des zones de pollution, et contribuent ainsi à l'augmentation globale observée. Celle-ci est estimée à 36% depuis 1750 et on estime qu'elle contribue à augmenter de façon non négligeable (0,35 Wm⁻²) l'effet de serre additionnel. Toutefois, l'ozone ayant une durée de vie limitée à quelques semaines dans la basse atmosphère, les teneurs observées reflètent la répartition des sources, à la différence d'autres gaz comme le gaz carbonique ou le méthane, qui eux ont le temps de se répartir et de se mélanger sur l'ensemble de la planète.

3 Activités humaines et réchauffement du climat : la prise de conscience

Dès le dix neuvième siècle, le suédois Svante Arrhénius attire l'attention sur le fait que l'homme est en train de modifier la composition de l'atmosphère en gaz carbonique à travers l'utilisation du charbon. A partir d'un calcul relativement simple, il estime que notre planète devrait se réchauffer de 5°C d'ici la fin du vingtième siècle... Mais ce n'est qu'à partir des années 1970 que ce problème de l'action potentielle des activités humaines sur le climat devient l'objet de l'attention des scientifiques.

Les *modélisateurs* en prennent d'abord conscience. Les années après la seconde guerre mondiale voient l'apparition des premiers calculateurs, alors bien rudimentaires. La prévision du temps est l'un des domaines explorés à partir de modèles fondés sur un système d'équations physiques qui permettent de décrire le mouvement de l'atmosphère et le cycle de l'eau depuis l'évaporation à la surface des océans jusqu'à la formation des précipitations. Développés en

vue d'applications en météorologie, science qui s'intéresse à la prédiction des perturbations dont on ne peut suivre l'évolution individuelle que sur quelques jours, ces modèles sont alors utilisés sur des échelles climatiques, celle du mois et au-delà. Dans ce cas, les prévisions portent sur des valeurs moyennes et non plus sur le suivi de perturbations individuelles. Les premières expériences conduites dans les années 1960 permettent de vérifier que ces modèles sont aptes à simuler les grandes caractéristiques du climat.

Mais les climatologues s'intéressent très vite à la capacité de ces modèles à rendre compte de climats différents de celui dans lequel nous vivons actuellement. Les expériences réalisées au cours des années 1970 examinent le cas du doublement de la teneur en gaz carbonique. Elles confirment qu'une telle modification se traduirait par un réchauffement significatif. Ces résultats sont pris au sérieux et motivent réunions scientifiques et rapports d'experts dont un publié en 1979 à l'initiative de la NSF (la Fondation Nationale des Sciences aux États-Unis) aux conclusions déjà très bien documentées. Mais c'est au cours de la décennie suivante que s'opère la véritable prise de conscience non seulement au sein de la communauté scientifique mais bien au-delà, à mesure que l'ampleur des conséquences de ce changement climatique, tant écologiques qu'économiques, commence à être cernée.

Sur les aspects scientifiques, les résultats des modèles climatiques s'accumulent. Certes, ils diffèrent sensiblement d'un modèle à l'autre ; ainsi le réchauffement prédit par 4 modèles différents (trois modèles américains, l'autre anglais) en cas de doublement instantané de la teneur en gaz carbonique varie entre 1.5 et 4.5 °C. Cette amplitude d'un facteur 3, dans la valeur de ce que les climatologues appellent dans leur jargon, la «sensibilité du climat», résulte pour l'essentiel de la façon dont est traitée la formation des nuages. Leurs propriétés optiques font qu'à la fois ils absorbent et réfléchissent le rayonnement solaire. Ils sont en outre affectés de façon différente selon qu'il s'agit de « nuages hauts » ou de « nuages bas ». Cette complexité fait que le comportement des systèmes nuageux est difficile à prendre en compte dans les modèles, et qu'il reste d'ailleurs une source majeure d'incertitude vis à vis de la prédiction du climat du futur. Mais, au-delà de ces incertitudes, tous les modèles, et cette affirmation reste quasiment vérifiée maintenant que le nombre de simulations a été multiplié par près d'un facteur 10, prédisent un réchauffement. Qui plus est, ce réchauffement est systématiquement plus important que celui, légèrement supérieur à 1°C, qui serait obtenu dans ce cas d'un doublement de la teneur en gaz carbonique, qui correspond à un forçage radiatif de 4 Wm^{-2} , en l'absence de toute rétroaction climatique. Il y a donc des mécanismes amplificateurs qui dominent la réponse du climat lors d'un accroissement de l'effet de serre et ce de façon tout à fait démontrable. Ainsi un réchauffement de l'atmosphère va, avec un certain délai, se transmettre aux couches de surface de l'océan. Ceci entraîne une augmentation de l'évaporation, qui croît exponentiellement en fonction de la température, et par voie de conséquence de la quantité de vapeur d'eau

présente dans l'atmosphère. Comme la vapeur d'eau est elle-même un « gaz à effet de serre », le forçage radiatif est amplifié. La diminution de la glace de mer, très réfléchissante vis à vis du rayonnement solaire, en réponse à ce réchauffement progressif de l'océan constitue un second facteur d'amplification (elle est alors remplacée une surface océanique beaucoup plus absorbante). A l'inverse, aucun des mécanismes compensateurs qui peuvent être évoqués n'apparaît efficace.

Dans une large majorité, la communauté scientifique est rapidement convaincue de l'ampleur du problème et de la nécessité d'en analyser toutes les facettes. Les premiers résultats obtenus sur les glaces antarctiques de VOSTOK suggèrent également que le climat soit un système amplificateur et participent de cette prise de conscience. A l'évidence, celle-ci bénéficie également du fait que les températures moyennes mesurées à la surface de la Terre dans les années 1980 sont clairement à la hausse... La communauté s'organise alors en conséquence. Dès 1979 l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) met sur les rails le Programme de Recherche Mondial sur le Climat (PMRC). Puis le CIUS, comité international qui regroupe l'ensemble des organisations scientifiques, conscient des interactions fortes qui existent entre climat et environnement, lance en 1986 un programme ambitieux dédié à l'étude de la géosphère et de la biosphère (le Programme International Géosphère Biosphère : PIGB). PMRC et PIGB sont deux des quatre composantes de ce qui est désormais connu sous le nom de programme « Global Change » (les deux autres sont consacrées à la biodiversité et à la dimension humaine du changement climatique). Grâce à ces initiatives internationales, bien relayées dans de nombreux pays par les organismes de recherche, la compréhension des mécanismes complexes qui gouvernent l'évolution du climat a largement progressé au cours des vingt dernières années.

Les gouvernements ne tardent d'ailleurs pas trop à emboîter le pas, conscients qu'il s'agit là d'un problème que l'on ne peut délibérément ignorer. D'autant que le Protocole qui bannit la production de composés contribuant à la destruction de la couche d'ozone, signé à Montréal en 1987, constitue un premier exemple de ce qui peut être entrepris en matière d'environnement global. Avec le recul, les décisions prises dans ce cadre s'avèrent tout à fait judicieuses et, grâce à elles, on peut espérer un ralentissement de la diminution de la couche d'ozone dans les décennies à venir puis une inversion du processus. Le consensus scientifique qui s'est rapidement établi, les conséquences bien identifiées et le nombre restreint de producteurs a largement facilité la signature puis la mise en oeuvre de ce protocole. Mais, s'il présente de nombreuses similarités, la réponse apportée au cas de l'ozone stratosphérique n'est pas entièrement extrapolable au problème du changement climatique, dont la complexité est beaucoup plus grande. L'existence d'un lien entre activités humaines et réchauffement climatique ne repose alors que les prédictions de modèles dont on sait qu'ils restent assez rudimentaires et les conséquences de ce réchauffement sont mal cernées. Par ailleurs, si des mesures visant à

limiter l'utilisation des combustibles fossiles doivent être décidées, elles seront difficiles à faire accepter tant les notions de développement économique et de confort individuel sont étroitement mêlées à celle de consommation d'énergie. La première étape est donc d'établir un diagnostic.

C'est avec cet objectif qu'en 1988 se crée, sous les auspices conjoints du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) et de l'OMM, le Groupement Intergouvernemental sur l'Étude du Changement Climatique (GIEC) qui nous est plus familier sous son sigle anglais d'IPCC (*International Panel on Climate Change*). Ce problème est alors pris en compte sur un plan plus politique et il est l'un des thèmes centraux abordés lors du Sommet de la Terre de 1992 de Rio au cours duquel est discutée la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC), ratifiée en 1994. En réponse aux arguments très documentés apportés par les scientifiques à travers les travaux du GIEC, le problème est rapidement pris au sérieux par les gouvernements. Ceux-ci mettent sur pied ce qu'il convient d'appeler la Conférence des Parties (COP), qui de Rio de Janeiro (COP1) à Kyoto en 1995 (COP3 ?) puis Marrakech en 2001 (COP7) ont été autant de jalons visant à mettre en place des règles de limitation des émissions anthropiques des gaz à effet de serre dont le sommet de Johannesburg pourrait voir une première concrétisation.

4 De Rio à Marrakech : l'empreinte des rapports du GIEC.

Dès le départ, le GIEC s'intéresse à trois volets distincts : le groupe I traite des aspects scientifiques de l'évolution du climat, les deux autres étant respectivement en charge d'en examiner les impacts et d'analyser les mesures d'adaptation et d'évaluation (groupe II) et d'en étudier les aspects socio-économiques (groupe III). A ce jour trois rapports complets ont été publiés, le premier en 1990, le second en 1996 et le troisième en 2001. Chaque rapport individuel est divisé en chapitres dont la première rédaction est confiée à une équipe d'une dizaine de chercheurs de différents pays. Pour accomplir cette tâche chaque rédacteur sollicite des contributions de chercheurs impliqués dans le domaine concerné. A partir de ces très volumineux rapports (près d'un millier de pages) sont rédigés des résumés d'une cinquantaine de pages puis les « Résumés pour décideurs » beaucoup plus courts et écrits de façon très accessible. Le tout est complété d'un rapport de synthèse. Une fois rédigés, chacun de ces documents reçoit les commentaires de la communauté scientifique (relecteurs) et ceux des représentants des instances gouvernementales. Le processus de rédaction et de relecture prend, à chaque fois, plus de deux ans pour que soit proposé aux gouvernements un texte qui ait l'approbation de la communauté scientifique. Le chiffre de 3000 personnes, mentionné pour le second rapport, comprend les rédacteurs (une centaine), les contributeurs (quelques centaines) et les re-lecteurs. Les commentaires provenant des différentes sources (communauté scientifique, instances gouvernementales

mais aussi organisations non gouvernementales) sont pris en compte par les rédacteurs et les textes sont amendés en conséquence. Si les rédacteurs jugent un commentaire non-recevable, ce qui est parfois le cas, ils doivent justifier de la ou des raisons qui les ont conduit à ne pas le prendre en considération.

Vient alors la dernière étape avant publication, celle de l'approbation par les gouvernements membres du GIEC (plus d'une centaine de pays). Les « Résumés pour Décideurs » sont discutés ligne à ligne par les délégués de ces différents pays et approuvés, après modifications éventuelles au cours de réunions auxquelles peuvent assister, au titre d'observateurs, des représentants d'organisations non gouvernementales. La règle est celle du consensus et celui-ci est quelquefois fort difficile à atteindre malgré les efforts des responsables du GIEC et des rédacteurs présents à cette réunion finale, dont l'objectif commun est de parvenir à une solution acceptable pour tous et qui reflète bien les rapports complets. Le contenu de ces derniers n'est pas rediscuté, mais celui des résumés étendus est également soumis à approbation et la cohérence entre les différents étages des rapports fait l'objet d'une très grande attention. Nous nous intéresserons ici essentiellement aux conclusions du groupe I qui traite de la science du changement climatique. Nous en résumons les travaux à travers une série de 4 conclusions.

Les deux premières font l'objet d'un consensus qui s'est affirmé au fil des 3 rapports du GIEC. L'une, que nous avons déjà largement traitée, affirme que les activités humaines modifient la composition de l'atmosphère en gaz à effet de serre. L'autre, déjà évoquée concerne le réchauffement observé au cours du vingtième siècle (Figure 2). Déjà visible au moment du premier rapport du GIEC, l'enregistrement disponible jusqu'à l'année 2001 en donne désormais une idée plus claire. Ce réchauffement s'est accéléré au cours des années récentes. L'année 1998 a été la plus chaude depuis 1880 et si l'on cherche les 10 années les plus chaudes, elles sont concentrées au cours des deux dernières décennies. Et c'est ce graphique pris dans son ensemble qui permet aux experts de conclure que notre climat s'est réchauffé d'un peu plus d'un demi degré (0,6 avec une incertitude de $\pm 0,2$ °C) depuis la fin du dix-neuvième siècle. Ce réchauffement s'est opéré en deux étapes la première entre 1910 et 1945, la seconde depuis 1976. Certains aspects, qualité et couverture géographique des données les plus anciennes corrections qu'il faut apporter aux températures océaniques mesurées par les bateaux marchands, biais apporté par l'urbanisation pour les stations qui, initialement à la campagne, se sont peu à peu retrouvées en milieu urbain,.... ont été l'objet de nombreuses discussions. Ces points ont été pris en compte de façon indépendante par différentes équipes et les courbes obtenues sont tout à fait similaires. A noter aussi la polémique engagée lorsque l'on compare, sur leur période de recouvrement, les températures mesurées à la surface de la planète et celles obtenues à partir de ballons sonde et d'observations satellitaires. La température de l'atmosphère observée depuis 1979 à partir des deux dernières méthodes augmente trois fois

moins vite que celle de la surface et il est difficile de dire s'il s'agit là d'un phénomène réel ou si cette différence est liée au fait que la période de comparaison est relativement courte. Par contre de nombreuses observations témoignent de façon indirecte de ce réchauffement : l'étendue des glaciers alpins diminue de façon quasi générale (les exceptions s'expliquent soit par la modification de la circulation atmosphérique, soit par l'augmentation des précipitations), la couverture

neigeuse et l'épaisseur de la glace de mer décroissent dans beaucoup de régions, lacs et rivières sont moins longtemps gelés, l'océan se réchauffe en surface, le niveau de la mer a augmenté d'une dizaine de centimètres au cours du vingtième siècle, il y a plus de vapeur d'eau dans l'atmosphère..... Malgré quelques zones d'ombre, le consensus est général : le climat se réchauffe.

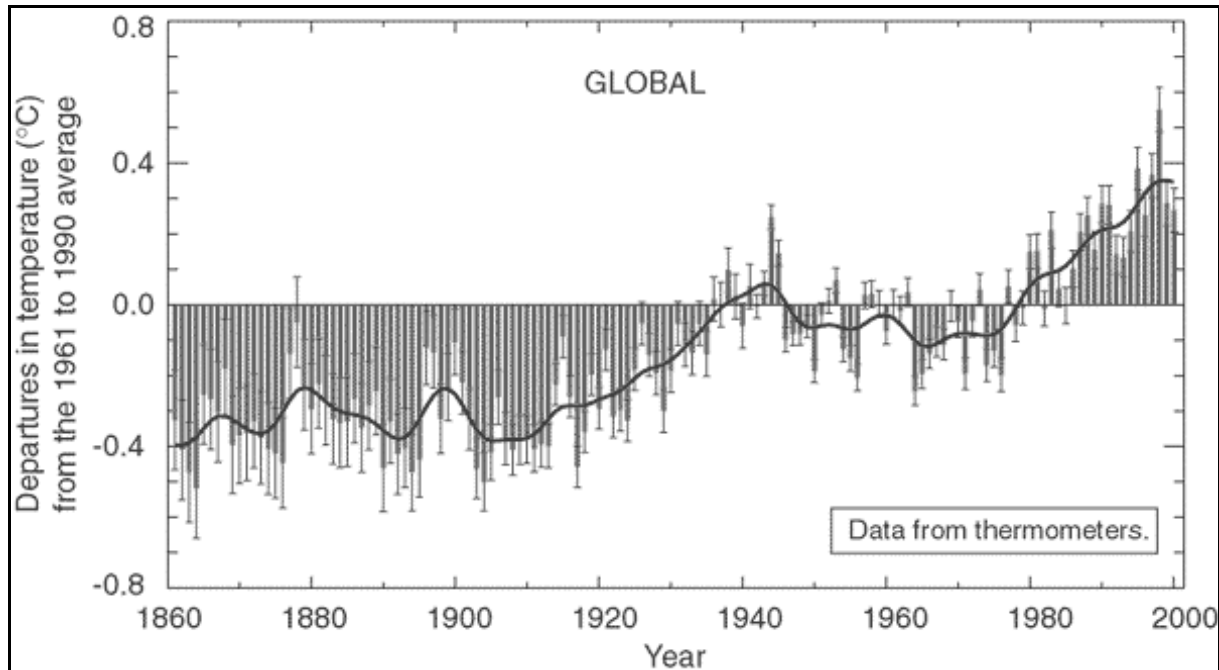


Figure 2 : Variation de la température moyenne de la planète depuis 1861 (adaptée du rapport IPCC 2001)

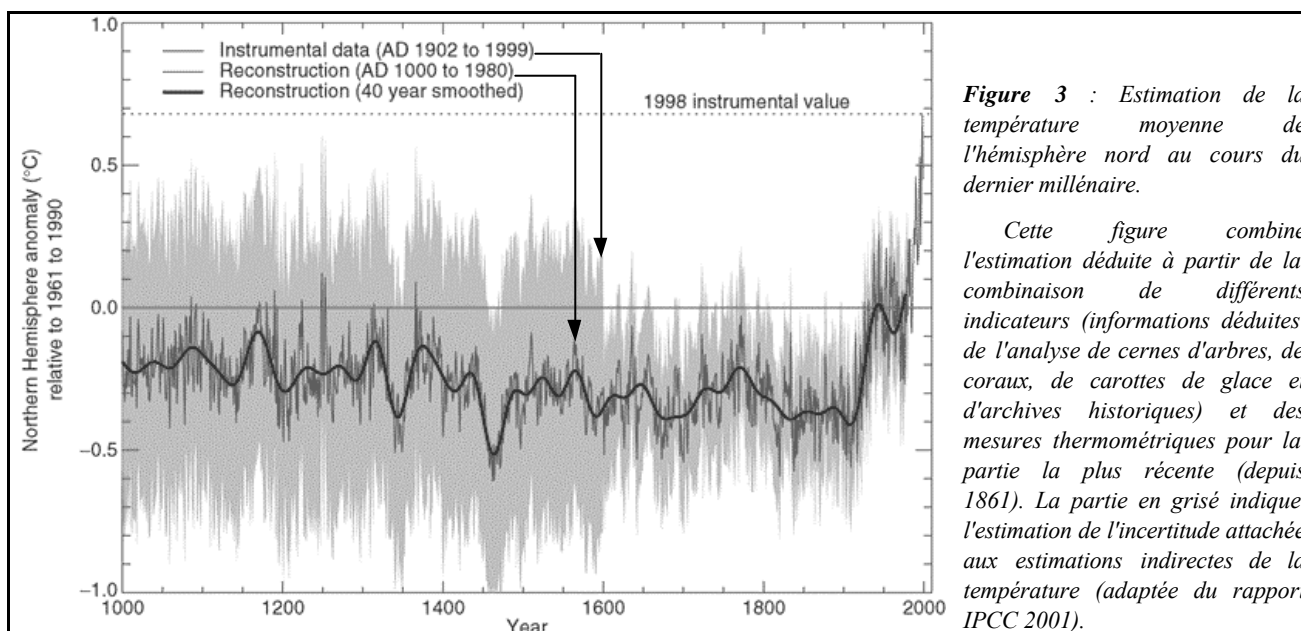
La troisième concerne un point certes important pour le scientifique mais qui s'avère être la question clé pour le décideur : le réchauffement que nous vivons à l'échelle de la planète a-t-il un lien avec l'augmentation démontrée de l'effet de serre ? Sans évoquer les grandes périodes glaciaires, il suffit de se tourner vers le passé récent pour observer qu'il n'est nul besoin que l'homme intervienne pour que le climat change de façon tout aussi notable qu'il l'a fait au cours du vingtième siècle. Pour la période que nous appelons le petit âge glaciaire entre le milieu du quinzième siècle et la fin du dix-neuvième, le constat est sans appel. Il s'appuie sur de nombreux témoignages tel celui de l'avancée des glaciers alpins ou ceux des peintres flamands et de leurs tableaux d'hivers rigoureux aux fleuves et rivières prises par les glaces. Lors de cette période froide qui a atteint son paroxysme entre 1550 et 1700, la température était, tout au moins en Europe de l'Ouest, d'au moins un degré plus froide que notre vingtième siècle. A l'inverse, le début du dernier millénaire, époque à laquelle le sud du Groenland était une terre hospitalière, était relativement plus chaud. Difficile dans ces conditions d'affirmer que le réchauffement que nous vivons actuellement est bien lié à l'augmentation de l'effet de serre dû aux activités humaines. L'effet de serre augmente et le climat se réchauffe mais il y a-t-il bien relation de cause à effet ? A cette question, le premier

rapport du GIEC répond que « l'importance du réchauffement observé est grossièrement cohérente avec les prédictions des modèles climatiques mais qu'elle est aussi comparable à la variabilité naturelle du climat. Le réchauffement observé pourrait donc être dû à cette variabilité naturelle ». Il y a une dizaine d'années, au moment du sommet de Rio, la réponse des scientifiques était donc "on ne sait pas". Mais elle a fortement évolué grâce à un ensemble de résultats scientifiques nouveaux qui permettent aux experts du GIEC d'indiquer dans le rapport 1995 "qu'un faisceau d'éléments suggère une influence perceptible de l'homme sur le climat global".

Un premier obstacle est levé. Jusqu'alors si on tient compte de l'augmentation des gaz à effet de serre depuis le début de l'ère industrielle, les modèles d'évolution du climat prédisent un réchauffement voisin de 1°C. C'est le double de celui observé, estimé alors à une valeur comprise entre 0.3 et 0.6 °C. Mais ces prédictions ne tiennent pas compte de tous les aspects liés à l'activité humaine. Ainsi elles ignorent l'effet de refroidissement résultant de la présence de particules microscopiques en suspension dans l'air. Celles-ci produites, en particulier, à partir de composés soufrés, partiellement produits par l'utilisation des combustibles fossiles, rendent l'atmosphère un peu moins transparente et absorbent une faible partie de l'énergie qui nous vient

du soleil, de l'ordre de $0,5 \text{ Wm}^{-2}$. C'est en fait suffisant pour contrecarrer une partie du réchauffement dû à l'augmentation de l'effet de serre et gommer le désaccord entre prédictions et observations. Plus convaincante pour le spécialiste est la mise en évidence de toute une série d'indices qui correspondent à autant d'empreintes attestant que le réchauffement observé n'est vraisemblablement pas uniquement d'origine naturelle. Ceux-ci s'appuient sur des comparaisons géographiques, saisonnières et verticales du réchauffement, dont les caractéristiques prédites et observées concordent d'autant mieux que les modèles tiennent compte du rôle de l'effet de serre et de celui des aérosols et non seulement de causes naturelles de variabilité climatique telles les éruptions volcaniques, qui peuvent provoquer un refroidissement notable mais de courte durée ou les faibles fluctuations de l'activité solaire. En outre, la prise en compte des aérosols soufrés donne une explication plausible au fait que la température se réchauffe plus le jour que la nuit car leur effet de refroidissement n'intervient que sur la partie visible du rayonnement et donc que le jour. Aucun de ces éléments, pris individuellement, ne constitue en soi une preuve mais c'est leur convergence qui a amené les scientifiques à suggérer que l'action de l'homme est déjà perceptible. C'est une conclusion importante qui, à l'évidence, a joué un rôle clé dans les négociations du Protocole de Kyoto. Suggérer, même avec prudence, que les activités humaines commencent à avoir une influence sur le climat, met désormais le changement climatique au centre des problèmes que notre société aura à affronter en matière d'environnement et lui donne une dimension socio-économique indéniable.

Le diagnostic s'est affiné entre les rapports GIEC de 1996 et 2001. Tout d'abord le climat a continué à se réchauffer et à ceci s'ajoute une meilleure connaissance des variations du climat au cours du dernier siècle. Déjà amorcée en 1995, elle se concrétise par la publication d'une courbe de la variation du climat au cours du dernier millénaire qui doit aux efforts conjugués de paléoclimatologues qui ont reconstruit différentes séries climatiques à partir d'approches complémentaires et de statisticiens qui les ont combinées et en ont extrait une valeur moyenne. Celle-ci reste entachée d'une grande incertitude (Figure 3) mais elle laisse peu de doute : le réchauffement récent sort de la variabilité naturelle. Les modèles climatiques, qui ont fait beaucoup de progrès, confirment ce diagnostic. Des simulations longues montrent que le réchauffement des 100 dernières années ne peut vraisemblablement pas être dû uniquement à des causes naturelles. En particulier, le réchauffement marqué des 50 dernières années ne peut-être expliqué que si l'on tient compte de l'augmentation de l'effet de serre. D'où cette conclusion « il y a de nouvelles et fortes indications qu'une grande part du réchauffement observé au cours des 50 dernières années est attribuable aux activités humaines ». De « peut-être » en 1995, nous voici à « probablement » en 2001. Le camp des sceptiques de l'effet de serre se rétrécit et cette conclusion, approuvée par le Groupe I au moment de la conférence de La Haye et entérinée dans le rapport de synthèse avant celle de Marrakech, a eu pour conséquence d'y placer le débat scientifique au second plan ... Dans l'esprit des décideurs, l'interrogation puis le doute vis à vis de l'action de l'homme sur le climat se sont transformées en quasi-certitude.



De notre point de vue, des interrogations subsistent comme celles liées à l'influence éventuelle des changements de l'activité solaire ; il nous faudra au moins une dizaine d'années pour transformer ce « probablement » en certitude. Mais un point extrêmement important est que la réponse à cette question ne préjuge pas de l'ampleur du réchauffement qui nous attend au cours de ce siècle et au-delà. Même si l'influence de l'effet de serre additionnel était toujours masquée par la variabilité naturelle du climat, l'augmentation prévue est d'une telle ampleur (de 4 à 8 W m^{-2} supplémentaires) qu'un réchauffement significatif peut, sans ambiguïté, être prédit d'ici la fin de ce siècle. C'est là la quatrième conclusion du rapport du GIEC qui indique également que de nombreuses incertitudes restent associées à la prédiction de l'évolution future de notre climat. Avant de les présenter nous revenons, plus en détail, sur la façon dont l'homme modifie et continuera à modifier la composition de l'atmosphère.

5 Effet de serre et activités humaines : état des lieux et évolution future.

Sans vouloir négliger l'importance des autres gaz à effet de serre, nous centrerons la discussion sur le gaz carbonique non seulement parce que sa contribution à l'effet de serre additionnel est de loin la plus importante (60 %) mais aussi à cause de son temps de résidence très long dans l'atmosphère. Ceci implique que la maîtrise de l'évolution de cet effet de serre additionnel passe obligatoirement par un contrôle des émissions de gaz carbonique. Cette maîtrise est inscrite dans la CCNUCC qui stipule que

« l'objectif est de stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. Il conviendra d'atteindre ce niveau dans un délai convenable pour que les écosystèmes puissent s'adapter naturellement aux changements, que la production alimentaire ne soit pas menacée et que le développement économique puisse se poursuivre d'une manière durable ».

L'augmentation de la teneur en gaz carbonique dans l'atmosphère n'est que le reflet d'une perturbation beaucoup plus importante, qui affecte l'ensemble du fonctionnement de la planète Terre. Le carbone est en effet contenu dans chacun des compartiments de l'environnement terrestre : atmosphère, océan, biosphère, Terre interne. Dans l'atmosphère, on le trouve essentiellement sous forme de gaz carbonique. Sur les continents, on le trouve en profondeur dans les combustibles fossiles, et en surface dans la végétation et la matière organique des sols. Dans les océans, il est principalement sous forme de carbonates, en particulier dans le principal réservoir de carbone que constitue l'océan profond. Tous ces compartiments sont en équilibre entre eux grâce à des flux d'échanges permanents, comme par exemple la respiration et la photosynthèse entre l'atmosphère et la biosphère, les échanges gazeux entre l'atmosphère et les océans, ou l'assimilation du carbone par les microorganismes dans l'océan. Ce système complexe est équilibré à l'échelle

des millénaires. Naturellement, lors de la transition entre une ère glaciaire et une période interglaciaire, les échanges entre compartiments de l'environnement terrestre se modifient et le système ne retrouve son équilibre qu'au bout de quelques siècles, voire quelques millénaires. Aujourd'hui l'homme induit à son tour un tel déséquilibre par les sources d'émission additionnelles qu'il contribue à créer : combustion des carburants fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel), émissions dues aux pratiques agricoles, déforestation qui diminue la capacité de la végétation à piéger le gaz carbonique contenu dans l'atmosphère. Certes, cette perturbation due aux activités humaines reste relativement faible en termes de flux d'échange, puisqu'elle correspond à l'émission annuelle de 7 milliards de tonnes (GtC) de carbone vers l'atmosphère, dont la plus grande part (6 GtC) est liée à la combustion des carburants fossiles. En effet, les flux d'échange naturels se chiffrent à l'équilibre en dizaine de milliards de tonnes. Mais cette amplitude est suffisante pour modifier les concentrations atmosphériques et surtout, sa rapidité est inquiétante. Même si une partie (2.0 ± 0.8 GtC) est absorbée par les océans, une autre, (1.9 ± 1.9 GtC) par la végétation et les sols, ce sont en moyenne plus de 3 GtC de carbone qui, chaque année, s'accumulent dans l'atmosphère.

Qu'en est-il pour le futur ?

Pour ce qui concerne les émissions, nous nous tournons vers les économistes auxquels le GIEC a demandé de proposer différents scénarios prenant en compte celles de l'ensemble des gaz à effet de serre mais également des composés soufrés dont, nous l'avons vu, l'effet radiatif est négatif. Ces scénarios, au nombre de 40, sont établis en tenant compte de différentes possibilités vis à vis des développements démographiques et économiques futurs et des avancées technologiques qui peuvent raisonnablement être attendues. Nous ne les décrirons pas en détail mais, et ce n'est pas une surprise, le scénario auquel sont associées les émissions les plus élevées allie un développement économique rapide et une utilisation privilégiée des combustibles fossiles, tandis que les émissions les plus faibles correspondent à une économie de services et d'information avec une recherche optimale de techniques propres et d'efficacité énergétique.

Dans le scénario maximum (Figure 4), les émissions annuelles de gaz carbonique (un peu moins de 30 GtC) vont à la fin du siècle vers un quadruplement de leur valeur actuelle (7 GtC) tandis que dans le scénario minimum, elles croissent légèrement puis reviennent à un niveau de 5 GtC. Les émissions des autres gaz, méthane et oxyde nitreux, sont également plus importantes dans le scénario maximum tandis que celles des composés soufrés diminuent dans presque tous les scénarios du fait des efforts importants entrepris depuis plusieurs années pour diminuer les causes de cette pollution.

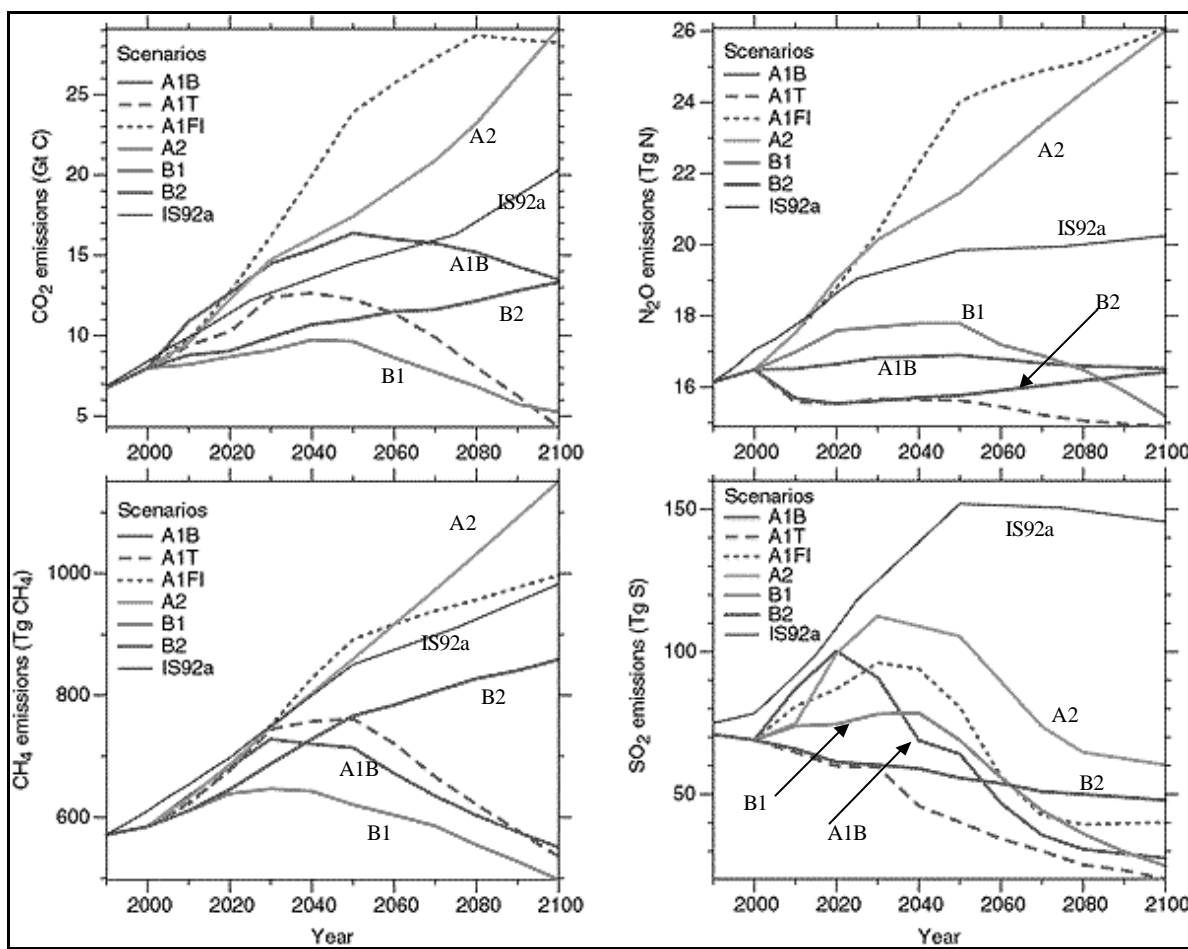


Figure 4 : Émissions de gaz carbonique, méthane, oxyde nitreux et dioxyde de soufre pour six des scénarios récemment proposés par le GIEC pour la période 1990 - 2100. Sont également indiquées sur cette figure les émissions correspondant au scénario IS92a largement utilisé depuis sa publication en 1992 (adaptée du rapport IPCC 2001).

L'étape suivante consiste à passer des émissions aux concentrations dans l'atmosphère à partir de modèles biogéochimiques. Pour le gaz carbonique ceux-ci tiennent compte des puits océanique et biosphérique et de leur évolution, et du fait qu'une fois dans l'océan le carbone y reste de l'ordre d'un millier d'années tandis que le stockage par la végétation n'est que très transitoire (quelques dizaines d'années). Là non plus pas de surprise : plus les émissions sont importantes, plus les concentrations deviennent élevées. Le scénario maximum nous entraînerait d'ici la fin du siècle vers des concentrations proches de 1000 ppm pour le gaz carbonique (triplement), 3 ppm pour le méthane (doublement) et 0,45 ppm pour l'oxyde nitreux (+50%). Traduites en termes de forçage radiatif, celui-ci serait augmenté de 8 Wm^{-2} Mais même le scénario minimum, celui pour lequel les émissions moyennes de gaz carbonique sont au cours du vingt et unième siècle proches de leur niveau actuel, a des conséquences alarmantes avec, en 2100, une concentration supérieure à 500 ppm et, tenant compte de l'ensemble des composés, un forçage radiatif supplémentaire de près de 3 Wm^{-2} .

Maintenir les émissions de gaz carbonique à un niveau constant ne suffit donc pas pour que sa

concentration se stabilise alors que la stabilisation des émissions de gaz à courte durée de vie tel que le méthane se traduit en quelques décennies au niveau de sa concentration dans l'atmosphère. Nous touchons là un point essentiel qui explique pourquoi les scientifiques considèrent que le protocole de Kyoto qui stipule une légère diminution des émissions de gaz carbonique n'est qu'une étape d'autant plus qu'en étaient dispensés les pays en voie de développement. Ceci étant, et nous y revenons plus en détail à la fin de cet article, c'est un premier pas indispensable, un passage obligé pour qu'ultérieurement, puissent être mises en place des règles plus contraignantes. Et même si les règles édictées à Kyoto ont été assouplies au cours des COP successives, si les États-Unis, principal émetteur de gaz carbonique refusent désormais toute contrainte, l'accord entériné à Marrakech, représente toujours un bel espoir qui, s'il est ratifié à Johannesburg, sera salué comme un pas en avant prometteur.

Mais beaucoup reste à faire pour que l'objectif de stabilisation visé par la CCNUCC puisse un jour être atteint. Pour s'en convaincre adressons nous non pas aux économistes mais aux spécialistes du cycle du carbone. Pour que la concentration de gaz carbonique se stabilise, il faut que les émissions soient

contrebalancées par les puits océanique et biosphérique. Ce que confirment les modèles. Quelle que soit la concentration visée, il faut qu'à un moment donné dans le futur, les émissions annuelles redescendent en-dessous de leur valeur actuelle pour atteindre des valeurs de 2 à 3 GtC, voire moins. Si l'on se contente d'une stabilisation à 1000 ppm, ce qui du point de vue du climatologue est complètement déraisonnable, il faudra néanmoins que les émissions n'excèdent jamais 15 GtC puis reviennent en dessous de leur niveau actuel dans 2 siècles. Une stabilisation à 550 ppm, soit déjà le double de la concentration préindustrielle, requiert que les émissions ne dépassent pas 12 GtC en 2040 puis redescendent à leur valeur actuelle vers 2100 et à environ 2 GtC à la fin du vingt deuxième siècle. Mais si nous nous assignons un objectif, plus raisonnable, de 450 ppm, c'est dès 2020 que les émissions doivent diminuer pour atteindre leur valeur actuelle en 2050 et moins de 3 GtC à la fin du siècle. Certes la photosynthèse est favorisée par l'augmentation de la concentration en gaz carbonique avec, à la clé, l'espoir d'un puits biosphérique de plus en plus important. Mais d'autres effets (augmentation de la décomposition de la matière organique des sols, répartition différente des espèces...) annihilent l'absorption supplémentaire résultant d'une croissance plus importante de la végétation. Ils vont même au-delà et l'on peut craindre que la végétation ne se transforme de puits de gaz carbonique en source.... La capacité cumulée d'absorption de l'océan et de la biosphère risque en fait de diminuer à partir du milieu du vingt et unième siècle. Entre les 30 GtC du scénario maximum, celui pour lequel aucun effort n'est fait pour limiter l'effet de serre et celui certainement souhaitable d'une stabilisation à une concentration pas trop éloignée de sa valeur actuelle, c'est donc à terme un effort de l'ordre d'un facteur 10 qu'il faut réaliser. Le fossé est immense....

Aujourd'hui, l'essentiel des émissions de gaz carbonique provient de l'utilisation des combustibles fossiles qui correspond à environ 6 milliards de tonnes de carbone émises par an. La stabilisation des concentrations atmosphériques impliquerait une réduction des émissions de plus de 40%. D'où l'ampleur du problème puisque ce sont directement les modes de production de l'énergie qui sont ainsi mis en cause. Ceux-ci reposent en effet pour 40% sur le pétrole, 20% sur le gaz et 25% sur le charbon. Il est intéressant ici de réfléchir à ce que pourrait être une répartition équitable des 2 à 3 milliards de tonnes auxquelles il faudrait revenir pour stabiliser la concentration atmosphérique en gaz carbonique. Pour une population de 6 milliards d'habitants, chaque habitant de la Terre disposerait donc de 500 kilogrammes de carbone fossile par an. Ce chiffre représente environ 10% des émissions actuelles d'un Américain, 15% de celles d'un Allemand, 25% de celles d'un Français, mais 120% de celles d'un Indien et 200% de celles d'un habitant de certains pays d'Afrique subsaharienne. On peut également noter que ce plafond est atteint par un seul aller et retour Paris - New York en avion ou l'utilisation de 2 tonnes de béton. L'effort à fournir pour stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre est donc immense et en tout cas incompatible

avec une vision du développement fondé sur l'idée de consommer toujours plus. Face aux inégalités actuelles et à la nécessité de développement des pays émergents, la voie de sortie consiste vraisemblablement à faire en sorte que l'Inde et la Chine puissent se développer sans augmenter dans le futur leurs émissions de gaz à effet de serre, mais que, dans le même temps, les pays riches en émettent considérablement moins.

D'autant, nous l'avons vu que le problème n'est pas seulement quantitatif et que la variable temps joue aussi sur le niveau de stabilisation, compte tenu notamment des constantes de temps mises en jeu dans le cas du gaz carbonique par les échanges avec les océans et la biosphère. Ainsi, les décisions que l'on prendra au cours des 15 ou 20 prochaines années fixeront les trajectoires, raisonnables ou plus catastrophiques, à l'échelle du vingt et unième siècle, et même des siècles suivants.

6 Quel futur pour les climats de la Terre ?

Alors que l'étude des climats actuel et passé combine observations et simulations numériques, la prédiction de son évolution future ne peut faire appel qu'à la modélisation. Prenant en compte les différents scénarios évoqués ci-dessus, les modèles climatiques fixent une fourchette d'augmentation moyenne de la température à l'horizon 2100 comprise entre 1,4°C et 5,8°C (Figure 5).

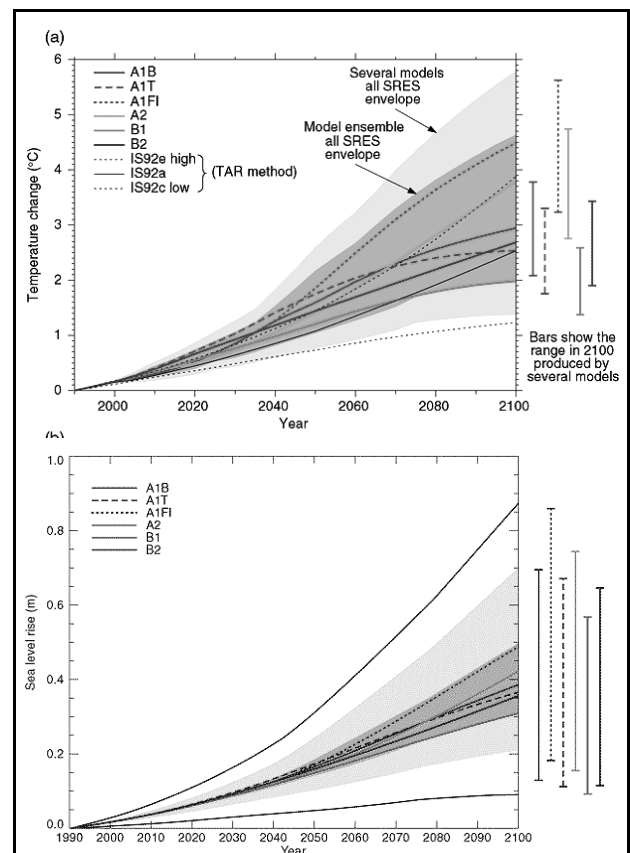


Figure 5 : Prédiction, jusqu'en 2100, de l'augmentation de la température moyenne de la planète et du niveau de la mer pour différents scénarios proposés par l'IPCC (adaptée du rapport IPCC 2001).

Ainsi le vingt et unième siècle sera certainement un siècle de rupture, caractérisé par une transition extrêmement rapide et une amplification importante du réchauffement moyen comparé à celui observé au vingtième siècle. L'amplitude de la fourchette tient à deux causes principales, dont chacune représente à peu près la moitié de l'incertitude. La première est bien évidemment notre connaissance imparfaite du système et l'imprécision relative des modèles déjà mise en évidence. La seconde est liée à la difficulté de prévoir nos comportements en matière d'émissions de gaz à effet de serre. Ce réchauffement sera accompagné d'une augmentation du niveau de la mer, largement liée à la dilatation de l'océan et dont l'estimation est comprise entre 9 et 88 cm.

Un aspect que met en exergue le troisième rapport du GIEC concerne l'inertie du système (Figure 6). Nous l'avons discuté pour ce qui concerne le lien entre concentration atmosphérique et émissions de gaz carbonique. Il intervient également pour la température et, encore plus, pour le niveau de la mer. Plaçons nous à un moment dans le futur où les concentrations auront été stabilisées. La température moyenne de la planète va cependant continuer à augmenter avec, suivant les cas, de 50 à 90% du réchauffement réalisé ceci à cause de l'inertie de l'océan de surface qui met du temps à

s'équilibrer avec l'atmosphère. Suivant le niveau de stabilisation de l'effet de serre, la température une fois l'équilibre atteint pourrait avoir augmenté de 3 à 8°C. Pour le niveau de la mer l'inertie est beaucoup plus grande car c'est l'océan dans son ensemble qui est impliqué dans le processus de dilatation thermique. Une fois les concentrations en gaz carbonique à l'équilibre, le niveau de la mer continue à monter de façon quasi linéaire pendant plusieurs siècles : s'il est monté de 50 cm à la fin du siècle, il passera à plus de 2 mètres au milieu du millénaire. S'y ajoute le risque non négligeable que la calotte du Groenland, située dans une région de haute latitude dans laquelle le réchauffement est amplifié, ne commence à fondre et contribue de quelques mètres supplémentaires à l'élévation du niveau des mers. Même dans le cas d'une politique très volontariste conduisant à la stabilisation de l'effet de serre, on peut donc raisonnablement craindre à l'échéance de quelques siècles des augmentations de température de l'ordre de celles qui ont accompagné le passage d'une période glaciaire à une période interglaciaire et une montée du niveau de la mer qui pourrait atteindre 5 mètres. Nul besoin devant ces chiffres d'insister sur l'absolue nécessité d'une politique de réduction des émissions.

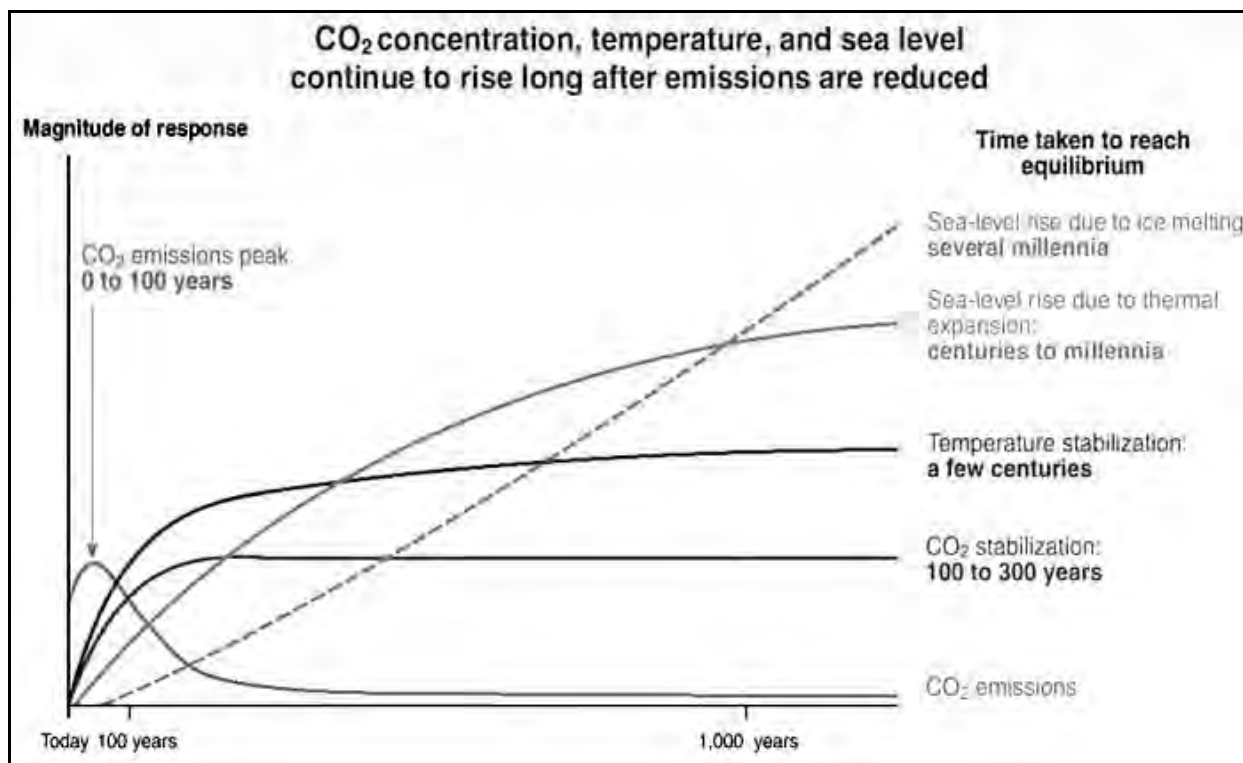


Figure 6 : Cette figure, adaptée du rapport de synthèse de l'IPCC (2001), illustre l'inertie de différentes composantes du système climatique.

De plus, ces indicateurs correspondent à des valeurs moyennes dont l'estimation est largement basée sur l'utilisation de modèles simples qui seuls permettent d'examiner l'ensemble des scénarios. Mais comme tout système subissant une perturbation, le système

climatique est également soumis à une variabilité accrue autour de ces valeurs moyennes. Celle-ci peut alors se traduire par une augmentation de la fréquence des événements extrêmes : périodes plus chaudes ou plus froides, pluviosité accrue ou sécheresse intense,

renforcement des tempêtes. Elle implique également une modification des phénomènes qui régissent la variabilité naturelle du climat aux échelles de temps inter annuelles. Ceux-ci ressortent principalement d'interaction entre les océans et l'atmosphère, à l'exemple du phénomène El Nino qui affecte régulièrement, tous les deux à quatre ans, l'Océan Pacifique tropical. Il est caractérisé par un déplacement des eaux chaudes de surface de l'ouest vers l'est du Pacifique et entraîne une modification importante des régimes de précipitations sur ces régions. Il engendre ainsi des sécheresses redoutables en Australie, Indonésie et dans le Nordeste brésilien, et des inondations violentes au Pérou, en Argentine et jusqu'en Californie. Les événements El Nino observés récemment semblent montrer que l'intensité de ce phénomène s'accroît dans un climat plus chaud.

C'est une difficulté supplémentaire que de prévoir ces changements climatiques aux échelles pertinentes des phénomènes, du local au régional. Ceci ne peut se faire que grâce à l'outil de modélisation et de simulation du système de l'environnement terrestre qui a été développé au cours des 20 dernières années. C'est un outil extrêmement complexe puisqu'il s'agit, sur la base des lois de la physique, de la dynamique et de la chimie, de simuler le comportement des différents compartiments de l'environnement : océan, atmosphère, biosphères terrestre et marine, cryosphère. Ces modèles sont d'autant plus complexes, qu'ils doivent non seulement rendre compte du comportement de chaque compartiment, mais également des couplages qui les lient entre eux. Ils sont bien sûr loin d'être parfaits, et ce pour deux raisons essentielles :

- La première est que notre compréhension du fonctionnement de l'ensemble du système reste incomplète.

- La seconde tient au fait que les modèles ne peuvent simuler ce fonctionnement avec la résolution quasi infinie qu'impliquerait la prise en compte des échelles les plus fines des phénomènes mis en jeu (résolution spatiale de l'ordre du centimètre ou moins, et résolution temporelle supérieure à la seconde). Ils ont aujourd'hui des mailles de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres et des échelles de temps de l'ordre de quelques jours, voire du mois. Ceci suppose donc que les phénomènes d'échelles plus courtes spatialement et plus rapides temporellement, soient paramétrés, ce qui constitue une importante source d'incertitude. Une des difficultés essentielles étant l'extrême hétérogénéité des échelles spatiales et temporelles, et notamment le fait que la différenciation des processus sur les échelles verticales s'opère sur des distances beaucoup plus faibles que sur la dimension horizontale. Une variation d'altitude de quelques dizaines de mètres dans l'océan ou l'atmosphère induit des différences extrêmement importantes. Dans ce contexte, une étape importante reste la validation de ces modèles qui prend en compte l'ensemble des données dont nous pouvons aujourd'hui disposer. Ces validations se fondent aussi bien sur la comparaison avec les observations actuelles, que sur la reconstitution des climats du passé.

7 Les conséquences du changement climatique

Une difficulté supplémentaire survient lorsque l'on veut prévoir les conséquences potentielles d'un changement climatique. Pour que ces prévisions aient un sens et puissent déboucher sur des mesures d'adaptation ou de correction, celles-ci doivent être évaluées à des échelles d'espace au moins régionales, voire locales. Or, en règle générale, les modèles les plus performants ne s'accordent que sur des fourchettes d'évolution des valeurs moyennes. Leur accord est moins bon dès lors qu'il s'agit de quantifier la variabilité climatique dans le temps et dans l'espace. Pour la température à la surface du globe, les modèles convergent pour montrer que le réchauffement sera plus intense dans les régions de hautes latitudes, en particulier dans l'hémisphère Nord. Mais, lorsque l'on s'intéresse aux précipitations, si tous les modèles prévoient une intensification du cycle de l'eau, avec des précipitations accrues dans les régions des hautes et moyennes latitudes, et des périodes plus sèches dans les régions tropicales et des basses latitudes, la limite entre ces deux régimes reste pour le moins difficile à préciser. Pour rendre compte de cette incertitude, on pourrait dire « qu'il pleuvra plus au Nord et moins au Sud d'une ligne passant par le centre de la France à 1 500 km près" ! Ce qui, en en conviendra, laisse une certaine marge de manoeuvre pour l'aménagement du territoire métropolitain.

Néanmoins, un certain nombre de conséquences potentielles du changement climatiques peuvent d'ores et déjà être mises en avant, de façon plus ou moins précise. Si la Terre se réchauffe en moyenne, les isothermes vont se déplacer, entraînant des modifications des écosystèmes : mutations des grands types de végétation avec en particulier un recul des surfaces boisées, sécheresse accrue dans les latitudes tropicales et risque de conditions extrêmes. En outre, certains écosystèmes assez fragiles seront particulièrement sensibles aux changements climatiques, et notamment les écosystèmes de montagne et les écosystèmes côtiers. Dans ce dernier cas, l'effet conjugué de variations climatiques locales et de l'élévation du niveau des mers peut avoir des conséquences importantes si l'on se souvient qu'une grande partie de la population du monde vit à proximité des côtes, et notamment dans les deltas des grands fleuves. En ce qui concerne la France, il est difficile, compte tenu des incertitudes déjà citées, de prévoir les conséquences à l'échelle régionale d'un changement climatique. Le climat sera vraisemblablement plus sec au sud, et plus pluvieux au nord. Les événements extrêmes comme les tempêtes pourraient être plus fréquents, et l'enneigement diminuer sur les reliefs alpins.

Comme nous l'avons déjà noté, tous les modèles montrent qu'en dehors de la valeur moyenne, c'est la variabilité du climat qui risque de s'amplifier au cours des prochaines décennies. Celle-ci dépend pour une large part des couplages entre les différents compartiments du système Terre et est donc d'autant plus difficile à prévoir avec précision. Il est cependant très probable que les régions désertiques et subdésertiques seront particulièrement concernées.

Autrement dit, certains des pays en voie de développement, qui doivent déjà faire face à des problèmes difficiles d'alimentation, risquent à nouveau d'être perdants dans la perspective d'un changement climatique. Une autre difficulté tient au fait que dans cet effort d'appréciation du futur, les données du passé ne sont pas suffisamment précises pour nous apporter des éléments de réponse. Une référence pourrait ainsi être la période de l'optimum climatique de l'holocène, voici environ 8 000 ans, quand les températures étaient en moyenne supérieure de 2°C à 3°C aux valeurs actuelles. La France était alors une gigantesque forêt avec des types de végétations variés. Mais les conditions étaient également trop différentes en termes d'occupation des sols pour que l'on puisse en tirer quelque conséquence que ce soit. Ce que nous confirment en revanche ces reconstitutions du passé, c'est qu'un écart de température de quelques degrés en valeur moyenne suffit à modifier complètement la nature des écosystèmes.

L'approche des changements climatiques ne peut pas non plus se restreindre à une simple extrapolation linéaire des évolutions actuelles à l'échelle des décennies ou des siècles. Nous ne sommes probablement pas à l'abri d'une « surprise » plus rapide, liée au caractère non linéaire des couplages entre les océans, l'atmosphère et la biosphère. Un tel effet non linéaire s'est déjà produit dans l'atmosphère sous la forme du « trou d'ozone » dans l'Antarctique. Dans le cas du changement climatique, l'exemple d'un ralentissement du Gulf Stream est parfois mis en avant. Le Gulf Stream est ce courant chaud qui amène sur l'Europe de l'Ouest de l'énergie thermique en provenance des zones équatoriales et tropicales et qui nous permet d'avoir un climat largement plus doux que celui de nos amis canadiens, qui sont pourtant situés aux mêmes latitudes. Il est lié et alimenté par la plongée des eaux dans les hautes latitudes de l'océan Arctique Nord. Or, si la fonte des glaces de mer dans cette région, qui semble s'accélérer au cours des dernières décennies, n'a pas d'influence sur le niveau des mers, en revanche, elle diminue la salinité de l'océan puisqu'elles sont constituées d'eau douce. Comme la salinité est l'un des facteurs qui détermine précisément la plongée des eaux vers les profondeurs, sa diminution pourrait conduire à un ralentissement du courant. On sait que cette situation d'absence du Gulf Stream s'est déjà produite plusieurs fois dans le passé, à l'échelle de centaines de milliers d'années. En effet, on retrouve dans les sédiments le témoignage de périodes beaucoup plus froides. Dans le cas présent, un tel basculement pourrait s'opérer en quelques décennies, et nous obliger à nous adapter rapidement à un climat analogue à celui du Québec. Ainsi, le réchauffement moyen de la Terre risquerait de conduire, du fait d'une instabilité climatique, à un refroidissement rapide de certaines régions. Ce risque n'est cependant pas confirmé par les modèles couplés les plus complexes. En cas de réchauffement climatique, ceux-ci prédisent bien un ralentissement du Gulf Stream lié à l'accroissement de l'évaporation dans les régions tropicales auquel sont associées des précipitations supplémentaires dans l'Atlantique Nord. Cependant c'est un moindre

réchauffement, plutôt qu'un refroidissement qui est alors prédit sur l'Europe de l'Ouest.

Un groupe de travail du GIEC s'est également intéressé aux conséquences des changements climatiques sur la santé humaine. Il importe dès le départ de noter que leur appréciation reste largement de l'ordre du qualitatif. Les premières conséquences pourraient être liées à la recrudescence de phénomènes extrêmes comme les cyclones, les inondations ou les vagues de chaleur. En revanche, la fréquence des périodes très froides pourrait diminuer à nos latitudes. On peut ensuite penser à des effets secondaires : par exemple une fréquence accrue des périodes sèches peut entraîner des phénomènes d'érosion, et donc une mise en suspension plus importante de poussières et de pollens dans l'atmosphère augmentant les risques d'allergie. Des maladies infectieuses comme le paludisme, la fièvre dengue, la fièvre jaune, ou les encéphalites risquent de connaître une recrudescence dans les zones de basse et moyenne latitudes liée à l'augmentation de la température moyenne, et à la possibilité de remontée des maladies tropicales vers des régions plus septentrionales. D'autres facteurs peuvent également influencer la santé humaine, comme la diminution du rendement des productions agricoles, en particulier dans les zones tropicales, avec l'occurrence de périodes de sécheresse plus aiguës et des problèmes exacerbés de malnutrition et de famine. Il est enfin pour le moins évident que la vulnérabilité des populations sera directement fonction de leurs ressources naturelles, de leur ressources techniques et sociales, et on peut donc légitimement penser que ce seront à nouveau les populations les plus fragiles qui auront à subir, en termes d'alimentation et de santé, les conséquences maximales des changements climatiques.

8 Changement climatique, énergie et développement durable

Il est évident que les climatologues ne peuvent pas "guérir" le climat. Compte tenu des incertitudes actuelles très importantes sur le fonctionnement même du système de l'environnement terrestre, toute tentative de réparation, fondée sur une modification anthropique de tel ou tel processus climatique, s'apparenterait à un jeu d'apprenti sorcier. La seule façon que nous ayons aujourd'hui de diminuer les effets de la perturbation anthropique est d'en limiter l'amplitude. Il nous faut donc réfléchir à une maîtrise raisonnée des émissions de gaz à effet de serre, qui renvoie immédiatement au problème des sources d'énergie et du développement durable.

La prise de conscience de l'ampleur du problème à l'échelle mondiale remonte seulement au début des années 1990 avec la signature de la Convention de Rio de Janeiro sur le changement climatique. Un protocole de réduction des émissions a ensuite été signé à Kyoto en 1997 qui prévoit un objectif moyen de réduction des émissions de -5% en 2008-2012 par rapport au niveau atteint en 1990. Nous sommes effectivement loin de la réduction de 40% nécessaire pour stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, mais les premières mesures sont

souvent les plus difficiles à prendre. De plus, il faut tenir compte du fait que la prolongation des tendances d'accroissement annuel des émissions observées dans les années 1980 conduirait à des émissions en 2010 supérieures de 30% à 40% à celles de 1990. C'est donc bien une véritable rupture qu'implique le protocole de Kyoto. Ses objectifs sont modulés suivant les différents pays. Les engagements des États-Unis sont ainsi de -7%, ceux de la Russie de 0%, du Japon de -6% et de l'Union Européenne de -8%. Dans la bulle européenne, l'objectif fixé à la France est de 0%, celui de l'Allemagne de -21%, celui du Royaume Uni de -12,5%, alors que le Portugal et la Grèce peuvent augmenter leurs émissions de 25% et l'Espagne de 15%. Les pays en voie de développement et notamment la Chine et l'Inde ne sont pour l'instant pas concernés par ces réductions.

La France occupe une position particulière dans ces négociations, liée au fait que la majeure partie de l'énergie électrique est issue de modes de production qui ne sont pas fondés sur l'utilisation des combustibles fossiles : le nucléaire pour 80%, l'hydroélectrique pour environ 15%. De ce fait la principale contribution aux émissions de gaz à effet de serre vient des activités agricoles (45 millions de tonnes), dont l'essentiel résulte directement ou indirectement de l'élevage. En effet, en bilan consolidé (*L'Effet de serre, H. Le Treut et J.M. Jancovici, Flammarion 2001*), la production d'une tonne de blé revient à émettre 110 kilogrammes d'équivalent carbone, alors que la production d'une tonne de viande correspond à l'émission de 8 tonnes d'équivalent carbone. Les émissions directes des procédés industriels correspondent à la seconde source d'émissions de gaz à effet de serre (35 millions de tonnes), puis viennent la consommation des ménages (25 millions de tonnes) et les transports (25 millions de tonnes). En fait, les émissions de gaz à effet de serre ont diminué en France entre 1970 et 1990 du fait du développement de l'énergie nucléaire, en particulier dans les secteurs déjà cités de la transformation de l'énergie et de l'industrie. Ceci explique que notre pays ait, au sein de la bulle européenne, un objectif affiché de stabilisation des émissions en 2008-2012 par rapport au niveau atteint en 1990. Celui-ci reste néanmoins difficile à atteindre, dans la mesure où les efforts importants ayant déjà été faits dans le domaine des modes de production énergétique et de l'efficacité des processus industriels, la flexibilité principale reste liée à notre capacité à stabiliser les émissions dans les secteurs du transport et de la consommation des ménages qui ont fortement tendance à augmenter. Ce problème met donc en cause les modes de vie de chacun d'entre nous.

Quatre ans après sa négociation le protocole de Kyoto n'est toujours pas ratifié, même si les accords entérinés à Bonn puis à Marrakech en 2001, laissent espérer une ratification prochaine. L'entrée en vigueur du Protocole requiert en effet qu'un ensemble de pays représentant plus de 55% des émissions de gaz à effet de serre s'engage dans le processus. Le refus des États-Unis de ratifier le Protocole de Kyoto impose alors que l'Union Européenne, la Russie, le Japon et le Canada ou l'Australie soient parmi les signataires, ce qui semble aujourd'hui acquis. Mais la position des États-Unis principaux émetteurs de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale pose les conditions d'une réduction rapide des émissions, malgré le volontarisme affiché par les autres pays. Il est plus que probable que les objectifs, même modestes, fixés par le Protocole de Kyoto pour la période de référence 2008-2012 ne seront pas atteints. Aujourd'hui, l'Union Européenne n'a réduit ses émissions que de -1%. Quant aux États-Unis, dont l'objectif est de -7%, ils en sont à +20% par rapport à l'année de référence 1990. Seul les Pays de l'Est et la Russie ont d'ores et déjà réussi à remplir leurs objectifs du fait du ralentissement majeur de leur économie au cours des années 1990, se traduisant par une baisse des émissions de 38%. Ce qui dans le cadre de la mise en oeuvre d'un marché mondial de permis d'émission excite bien des convoitises. Cette difficulté qu'ont les principaux pays à se conformer aux objectifs du Protocole n'est d'ailleurs pas indépendante des positions affichées aujourd'hui quant à sa ratification. En ce qui concerne les pays en développement, les mécanismes mis en oeuvre dans le cadre de la Convention de Rio de Janeiro et du Protocole de Kyoto, notamment ceux liés au développement propre, portent l'espoir d'une solution raisonnable à moyen terme.

La ratification du Protocole de Kyoto est certainement une première étape nécessaire si l'on considère que de notre capacité à prendre rapidement les décisions qui s'imposent dépendra pour une large part l'avenir des générations futures. C'est tout l'enjeu d'un développement durable à l'échelle de la Planète, qui ne saurait laisser de côté les pays en voie de développement. Il implique un changement décisif de nos modes de vie et de consommation et une volonté partagée par une large part de l'humanité. C'est un enjeu politique déterminant pour le vingt et unième siècle.

Notions de fiabilité

Gérard LACROUX

Ancien Directeur Technique des Établissements Ragonot

Résumé : Cet article a pour but d'expliquer aussi simplement que possible ce qu'est la fiabilité, technique de la plus haute importance dans le domaine de la sécurité de fonctionnement. Il montre comment se quantifie une notion probabiliste restée longtemps qualitative.

1- La fiabilité

Le terme **fiabilité** est de création relativement récente. Issu du verbe **se fier**, il a été utilisé pour la première fois en 1964 dans le but de remplacer le terme anglo-saxon de *reliability* et adopté un peu plus tard par l'Académie française. Il est souvent utilisé dans le public pour caractériser un produit dans lequel on peut avoir confiance, mais pendant combien de temps et dans quelles conditions d'utilisation ? Il est bien évident que ce sens est incomplet.

La définition technique de la fiabilité peut être la suivante :

La **fiabilité** est la probabilité pour qu'un dispositif remplisse une fonction requise, dans des conditions d'emploi données, pendant un intervalle de temps t déterminé.

L'inaptitude à remplir cette fonction est la **panne** ou **défaillance** (*failure*)

On admettra que, les conditions d'emploi restant les mêmes, le **temps est la variable principale** dont dépend la fiabilité que l'on désignera par $R(t)$ avec t généralement exprimé en heures.

Par exemple, la fiabilité d'un certain moteur fonctionnant à une puissance déterminée, dans les conditions précisées par un cahier des charges, est, après une durée de fonctionnement $t = 3\,000$ heures, $R(3\,000) = 0,97$. C'est à dire que pour une population de 100 moteurs exécutant la même fonction dans les mêmes conditions, il n'en subsistera au bout de 3 000 heures que 97 capables de fonctionner correctement. Après une durée de fonctionnement $t = 6\,000$ heures dans les mêmes conditions, s'il ne subsiste que 94 moteurs, la fiabilité est $R(6\,000) = 0,94$.

Remarque: Pour certains appareils, il peut être plus normal de définir la fiabilité à partir d'une autre donnée que le temps : nombre de cycles (ouverture et fermeture pour un relais) nombre de tours ou de pas (moteurs pas à pas) ou distance parcourue (automobile)

2- Les défaillances

La probabilité de défaillance (*failure*) $F(t)$ est le complément à 1 de la fiabilité. On aura :

$$F(t) = 1 - R(t)$$

Dans les exemples ci-dessus, on a pour $t = 3\,000$ heures, $R(3\,000) = 1 - 0,03 = 0,97$ ou 97%.

On peut classer les défaillances en :

- défaillances précoces ou de jeunesse, celles qui se produisent dès le début du fonctionnement. Certains traitements (rodage par exemple), peuvent permettre d'éliminer, avant mise en service, un certain nombre de défauts;
- défaillances aléatoires, celles qui se produisent pendant ce que l'on appelle la vie utile de l'appareil;
- défaillances par usure, celles qui, en fin de vie, apparaissent de plus en plus fréquemment, traduisant l'usure mécanique ou électrique du matériel.

On définit un **taux de défaillance** λ_0 comme le nombre de pannes rapporté à l'intervalle de temps de fonctionnement considéré (en heures)

$$\lambda_0 = \frac{\text{nombre de défauts}}{\text{temps de fonctionnement}}$$

Dans la période de vie utile ce terme est généralement constant. On admettra par la suite que l'on se trouve toujours dans ce cas.

Ainsi, pour les moteurs de l'exemple précédent avec 3 pannes pour 100 moteurs sur une durée de 3 000 heures, on a, pour un moteur :

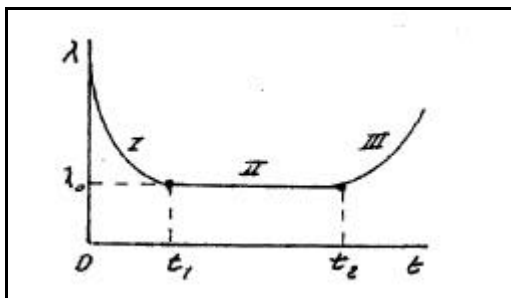
$$\lambda_0 = \frac{3}{100 \times 3000} = 1.10^{-5} \text{ panne par heure}$$

Dans l'exemple donné, on retrouve cette même valeur sur une période de 6 000 heures, comme pendant toute la vie utile de la machine, par exemple pendant 10 000 heures. Après ce temps, on entre dans la période d'usure où λ n'est plus fixe.

Finalement, le taux de défaillance évolue suivant une courbe dite **courbe en baignoire** (figure ci-dessous):

-La partie **I**, entre le temps 0 et le temps t_1 est la zone de jeunesse où le taux de défaillance décroît avec le temps. La partie **III** après le temps t_2 est la zone de défaillances par usure où le taux de pannes ne cesse de croître.

-La zone **II** entre ces deux parties, correspond à la **vie utile** de l'appareil, de durée $t_2 - t_1$, pendant laquelle le taux de défaillance est constant et égal à λ_0 .



Évolution du taux de défaillance en fonction du temps
Courbe en « baignoire »

Les taux de défaillance λ_0 des composants ont été déterminés par un long suivi du matériel et l'examen des défaillances et sont recensés dans les notices des fabricants, les recueils de normes et les ouvrages publiés par les organismes nationaux ou privés comme par exemple le CNET ou AFNOR.

3- Moyenne des temps de bon fonctionnement

La moyenne des temps de bon fonctionnement (*Mean Time Between Failures*) ou **MTBF** est

$$MTBF = 1 / \lambda_0$$

soit l'inverse du taux de défaillance. Ainsi, dans l'exemple précédent où $\lambda_0 = 1 \cdot 10^{-5}$ on obtient

$$MTBF = 100\ 000 \text{ heures}$$

Cette notion doit être maniée avec précaution et ne doit pas être confondue avec la durée de vie.

Le **MTBF** est l'intervalle moyen entre deux pannes ayant un caractère aléatoire. C'est une notion purement statistique qui indique, par exemple, dans le cas où le MTBF est de 100 000 heures, que sur un lot de 100 moteurs, l'un d'eux risque de tomber en panne au bout de 1 000 heures. Cette notion n'a de sens que pour un temps inférieur à la durée de vie du moteur.

4- Taux de défaillance d'un ensemble

Dans le cas d'un ensemble de N composants où la défaillance de l'un d'eux entraîne la défaillance de tout l'ensemble (configuration série) le taux de défaillance est égal à la somme des taux de défaillance des composants. Si un robot comporte 4 axes motorisés, son taux de défaillance est 4 fois plus élevé que celui d'un des moteurs. On peut étendre cette notion. Par exemple, un moteur électrique pourra être considéré comme un composant purement électrique associé en série à un composant purement mécanique.

La fiabilité peut être améliorée par l'emploi de deux composants se partageant la même fonction (redondance parallèle). Comme en général, la température est le caractère dégradant, on augmentera aussi la fiabilité en limitant l'échauffement par un déclassement du composant.

5-Valeurs pratiques de λ_0 pour quelques composants.

Ces valeurs sont données à titre purement indicatif pour du matériel fixe. Elles ne constituent que des exemples car elles évoluent sensiblement avec les conditions d'emploi.

Nature	$\lambda_0 \cdot 10^{-8}$
Résistance à 80°C	0,5 à 1
Condensateur "	0,5 à 1
Potentiomètre bobiné	2 à 1
Transistor de puissance	6 à 10
Diode de redressement	5
Transformateur	10
Moteur électrique d'usage général (3000 tr/mn. max., facteur de charge 60% à 80%)	
" avec balais	700 à 2 000
" sans balais	300 à 1 000

6 Références

Fiabilité. Recueil de données du Centre de Fiabilité du CNET

Recueil de données de fiabilité: RDF 2000 (pour l'électronique). Document UTE C80-810 de 2003

Norme USA MIL-HDBK 217F « Reliability Prediction of Electronic Equipment » (pour composants électroniques et machines tournantes).

M.SCHWOB & G.PEYRACHE *Traité de fiabilité.* Masson 1969

A.PAGES & M.GONDRAN *Fiabilité des systèmes.* Eyrolles 1980

L'auteur remercie les Ets Ragonot et en particulier M.Frédéric MEER, qui ont bien voulu lui communiquer les éléments de calcul concernant λ_0 .

Étude et réalisation d'un convertisseur auto-oscillant

Application à une alimentation à découpage de type "Flyback"

Dominique JACOB

IUT GEII Poitiers
6, allée Jean MONET BP 389
86 010 POITIERS Cedex

Résumé : Les convertisseurs auto-oscillants sont utilisés pour les applications de faible puissance à faible coût du fait de leur simplicité. Par exemple on rencontre, un onduleur auto-oscillant dans le culot des lampes fluorescentes dites "à économie d'énergie". Leur principe de fonctionnement est simple, mais le dimensionnement de leurs éléments nécessite une étude complète et rigoureuse car de nombreux modes de fonctionnement peuvent exister. On présente ici l'étude d'une alimentation à découpage de type "flyback" fournissant 20 W sous 200 V à partir d'une source de 12 V.

1. Etude du convertisseur Flyback auto-oscillant

1.1 Schéma du montage

La figure 1 présente le schéma du convertisseur continu-continu, il s'agit d'un oscillateur "bloqué" construit à l'aide d'un transistor IGBT.

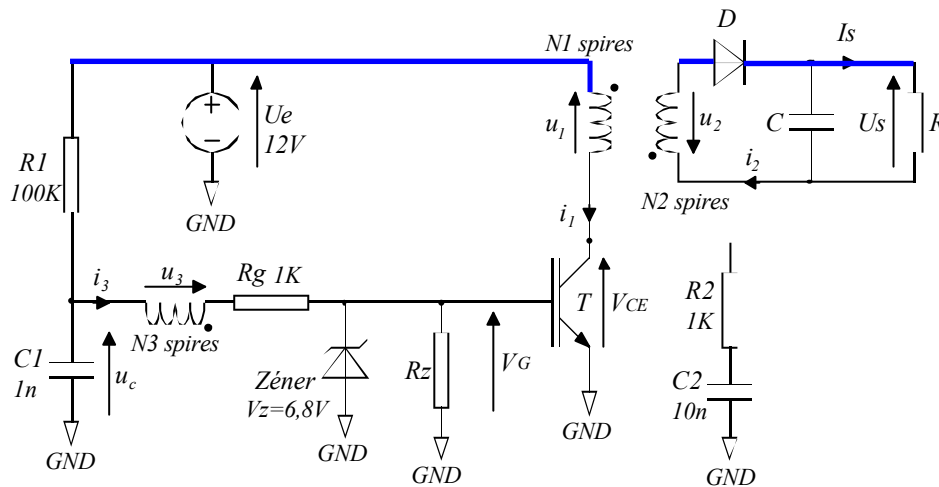


Figure 1 : Schéma de principe du convertisseur flyback auto-oscillant

Les 3 bobines de N_1 , N_2 , N_3 spires sont parfaitement couplées sur un circuit magnétique possédant la réluctance \mathfrak{R} . Le circuit R_2 - C_2 est un circuit d'aide à la commutation de l'IGBT, indispensable en pratique, pour éviter des oscillations hautes fréquences lors des commutations et pour limiter les surtensions dues aux inductances de fuite du transformateur. Pour l'étude du principe de fonctionnement on peut négliger son influence. Le transistor T possède la tension de seuil de grille $V_{th} \approx 5 V$. En régime linéaire le courant de collecteur est fixé par la tension V_{GE} selon la courbe de la figure 2 ci contre. Pour $V_{GE} > V_{th}$ on a $I_c = s.(V_{GE} - V_{th})$; la transconductance du transistor est $s = 3 A/V$

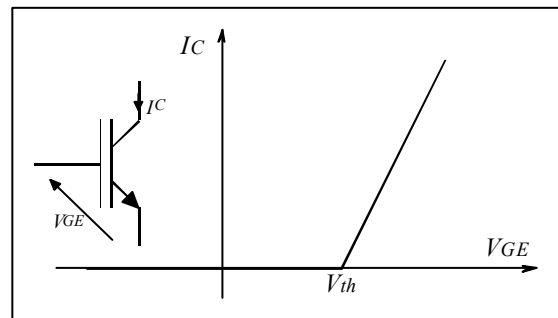


Figure 2 : Caractéristique idéalisée du transistor dans le domaine de fonctionnement

La diode Zéner est parfaite et possède la tension $V_z > V_{th}$ afin de permettre la conduction du transistor IGBT. Sa caractéristique idéalisée est présentée figure 3. La tension "directe" est $V_d \approx 0.7 V$.

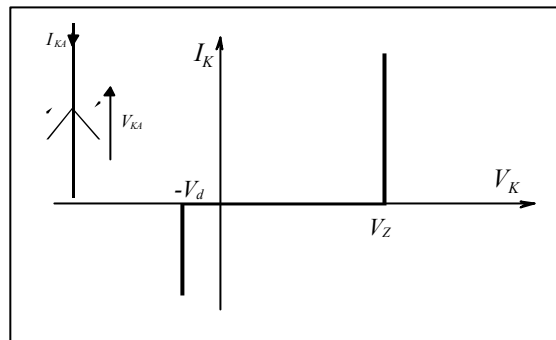


Figure 3 : Caractéristique idéalisée de la diode zéner

1.2 Principe de fonctionnement

Initialement tous les courants sont nuls, la capacité C_1 se charge à travers la résistance R_1 jusqu'à la tension $u_{c0} = \frac{R_z}{R_1 + R_g + R_z} U_e$ qui doit être supérieure au seuil de conduction du transistor. $V_{GE} = u_c$ augmente alors jusqu'à la tension de seuil V_{th} ce qui rend le transistor saturé. Alors le courant i_1 augmente et les tensions sur les bobines deviennent $u_1 = U_e$, $u_2 = \frac{N_2}{N_1} U_e > 0$ ce qui bloque la diode D et $u_3 = \frac{N_3}{N_1} U_e > 0$ ce qui crée un courant i_3 positif et polarise la diode zéner de telle sorte que $V_{GE} = V_z$, **le transistor est ainsi maintenu conducteur** (il y a une réaction positive). Le courant de collecteur ne peut pas dépasser la limite $I_{max} = s.(V_z - V_{th})$. Si le courant de collecteur est inférieur à cette valeur I_{max} le transistor est saturé ($V_{CE} \approx 0$) sinon le transistor est en fonctionnement linéaire et $V_{CE} > 0$. Quand le courant i_3 est positif il décharge la capacité C_1 , la tension u_c diminue et la tension V_{GE} va devenir inférieure à V_{th} ce qui conduira au blocage du transistor. Le temps pendant lequel le transistor reste saturé a la plus petite des deux durées suivantes:

- durée pour que le courant de collecteur atteigne la valeur I_{max}
- durée pendant laquelle $V_{GE} > V_{th}$

Après cette phase de fonctionnement **le transistor se bloque**, d'où $i_1 = 0$ mais le circuit magnétique est magnétisé et ne peut pas instantanément se démagnétiser ce qui impose $i_2 > 0$, la diode D est passante donc $u_2 = -U_s$, $u_3 = -\frac{N_3}{N_2} U_s < 0$ et aussi $i_3 < 0$ **ce qui maintient le transistor bloqué** (réaction positive) car alors $V_{GE} = -V_d$.

Cette phase dure tant que la diode D conduit (c'est à dire tant que $i_2 > 0$) et tant que $i_3 \leq 0$.

Quand le courant i_3 est négatif il charge la capacité C_1 , la tension u_c augmente et la tension V_{GE} va augmenter et atteindre la valeur V_{th} ce qui conduira à la mise en conduction du transistor.

Le temps pendant lequel le transistor reste bloqué a ainsi la plus petite des deux durées suivantes :

- durée tant que $i_2 > 0$
- durée pendant laquelle la tension $V_{GE} < V_{th}$

Si le transistor se bloque quand $i_2 > 0$ on aura démagnétisation incomplète du circuit magnétique et sinon on aura la démagnétisation complète sans temps mort entre la démagnétisation et la magnétisation suivante. La fréquence de fonctionnement dépend des éléments du montage et évolue librement en fonction de la tension de sortie U_s .

Les équations du fonctionnement idéalisé

Les composants sont idéalisés selon les figures 2 et 3, on néglige les chutes de tension des interrupteurs (transistor ou diode) à l'état passant et la résistance des bobines.

On note \mathbf{j} le flux par spire dans le circuit magnétique de réluctance \mathfrak{R} .

La tension de sortie U_s est constante (l'ondulation est rendue négligeable par le choix du condensateur C).

D'après la relation de Faraday : (1) $u_1 = N_1 \frac{d\mathbf{j}}{dt}$, (2) $u_2 = N_2 \frac{d\mathbf{j}}{dt}$, (3) $u_3 = N_3 \frac{d\mathbf{j}}{dt}$

La loi d'Hopkinson conduit à : (4) $N_1 i_1 + N_2 i_2 - N_3 i_3 = \mathfrak{R} \mathbf{j}$

(5) $u_c + R_1 C_1 \frac{du_c}{dt} = U_e - R_1 i_3$: régit la charge de C_1

(6) $V_{GE} = u_c + u_3 - R_g i_3$ (loi de la maille Grille-Emetteur)

(7) $V_{GE} = V_z$ si $i_3 > \frac{V_z}{R_z}$ ou $V_{GE} = -V_d$ si $i_3 < -\frac{V_d}{R_z}$ ou $-V_d < V_{GE} = R_z i_3 < V_z$

Soit 9 inconnues $u_1, u_2, u_3, i_1, i_2, i_3, \mathbf{j}, u_c, V_{GE}$ et seulement 7 équations. Les deux équations manquantes sont données par l'état du transistor T et de la diode D (on note : ON = passant, OFF = bloqué).

Si T est ON et D est OFF : $u_1 = U_e$ et $i_2 = 0$

Si T est OFF et D est ON : $i_1 = 0$ et $u_2 = -U_s$

Si T est OFF et D est OFF : $i_1 = 0$ et $i_2 = 0$

Le cas T ON et D ON est impossible,

(si T est ON la tension entre la cathode et l'anode de la diode D est $V_{KA} = U_s + \frac{N_2}{N_1} U_e > 0$ ce qui bloque la diode). Les

équations (5) et (6) conduisent à : $u_c + R_1 C_1 \frac{du_c}{dt} = U_e - R_1 \frac{u_c + u_3 - V_{GE}}{R_g}$

$\Leftrightarrow u_c [1 + \frac{R_1}{R_g}] + R_1 C_1 \frac{du_c}{dt} = U_e - \frac{R_1}{R_g} [u_3 - V_{GE}]$ soit :

(8) $u_c + \mathbf{t} \frac{du_c}{dt} = \frac{R_g}{R_1 + R_g} U_e - \frac{R_1}{R_1 + R_g} [u_3 - V_{GE}]$ où $\mathbf{t} = \frac{R_g R_1}{R_g + R_1} C_1$

1.3 Fonctionnement en régime permanent

1.3.1 Première phase de fonctionnement: T ON et D OFF

Le transistor est ON tant que $i_1 < I_{\max} = s.(V_z - V_{th})$ et tant que $i_3 > 0$ pour que la diode zéner impose $V_{GE} = V_z$.

Initialement le flux dans le transformateur est nul, $\mathbf{j} = 0$ pour $t = 0$.

On a $u_1 = U_e$ et $i_2 = 0$ $u_1 = U_e = N_1 \frac{d\mathbf{j}}{dt}$ conduit à $\mathbf{j} = \frac{U_e}{N_1} t$, d'où $u_2 = \frac{N_2}{N_1} U_e$, et $u_3 = \frac{N_3}{N_1} U_e$

On a aussi : $N_1 i_1 - N_3 i_3 = \mathfrak{R} \mathbf{j}$ et $u_c + \mathbf{t} \frac{du_c}{dt} = \frac{R_g}{R_1 + R_g} U_e - \frac{R_1}{R_1 + R_g} [u_3 - V_{GE}]$

$V_{GE} = V_z$ tant que $i_3 > i_{th} = \frac{V_z}{R_z}$; $i_3 = \frac{u_c + \frac{N_3}{N_1} U_e - V_z}{R_g} > i_{th}$ tant que $u_c > R_g \frac{V_z}{R_z} + V_z - \frac{N_3}{N_1} U_e$

Le courant i_3 ne sert qu'à polariser la diode zéner, il est limité par la résistance R_g , on choisit cette résistance pour imposer par exemple $i_3 < 20 \text{ mA}$. Par contre le courant i_1 traverse le collecteur du transistor et sert à stocker l'énergie dans le circuit magnétique, son ordre de grandeur est de quelques Ampères dans notre application. Pour cette raison on peut négliger l'excitation magnétique due à i_3 , c'est à dire négliger i_3 dans $N_1 i_1 - N_3 i_3 = \mathfrak{R} \mathbf{j}$ d'où

$i_1 \approx \frac{\mathfrak{R} \mathbf{j}}{N_1} = \frac{U_e \mathfrak{R}}{N_1^2} t = \frac{U_e}{L_1} t$; $L_1 = \frac{N_1^2}{\mathfrak{R}}$ est l'inductance propre de la bobine de N_1 spires. Par contre on ne néglige pas i_3

dans les autres expressions.

On note t_C le temps nécessaire au courant de collecteur $I_c = i_1$ pour passer de 0 à $I_{\max} = s.(V_z - V_{th})$ (courant pour lequel le transistor n'est plus saturé) soit $t_C = \frac{L_1 \cdot I_{\max}}{U_e}$. L'autre condition pour que T soit ON est que la diode zéner

soit polarisée, soit $i_3 > \frac{V_z}{R_z}$ or $i_3 = \frac{u_c + \frac{N_3}{N_1}U_e - V_z}{R_g} > \frac{V_z}{R_z} \Leftrightarrow u_c > (1 + \frac{R_g}{R_z}).V_z - \frac{N_3}{N_1}U_e$,

on pose $-U_1 = (1 + \frac{R_g}{R_z}).V_z - \frac{N_3}{N_1}U_e$

La décharge de la capacité C_1 évolue selon l'équation : $u_c + t \frac{du_c}{dt} = \frac{R_g}{R_1 + R_g}U_e - \frac{R_1}{R_1 + R_g} \cdot [\frac{N_3}{N_1}U_e - V_z]$

On note : $-U_{\infty} = \frac{R_g}{R_1 + R_g}U_e - \frac{R_1}{R_1 + R_g} \cdot [\frac{N_3}{N_1}U_e - V_z]$ le second membre de l'équation différentielle. La valeur initiale

est $u_c(0) = U_0$ La solution est alors : $u_c = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} - U_{\infty} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$

On note t_{G1} le temps pour lequel $u_c(t_{G1}) = (1 + \frac{R_g}{R_z}).V_z - \frac{N_3}{N_1}U_e = -U_1$ soit :

$u_c(t_{G1}) = U_0 \cdot e^{-\frac{t_{G1}}{\tau}} - U_{\infty} \cdot (1 - e^{-\frac{t_{G1}}{\tau}}) = -U_1$ d'où $t_{G1} = \tau \cdot \text{Log}[\frac{U_{\infty} + U_0}{U_{\infty} - U_1}]$. Ce temps dépend de la valeur initiale U_0

inconnue à ce stade de l'étude mais en fait il est fixé surtout par la constante de temps $\tau = \frac{R_g \cdot R_1}{R_g + R_1} \cdot C_1$. La durée de cette

phase (T ON et D OFF) est alors $t_{ON} = \inf(t_C, t_{G1})$

Le flux maximum dans le circuit magnétique à la fin de cette phase est $j_{\max} = \frac{U_e}{N_1} \cdot t_{ON}$

Dès que le courant i_3 devient inférieur à la valeur minimale $i_{th} = \frac{V_z}{R_z}$ le transistor est commandé par la tension

$V_{GE} = R_z \cdot i_3$, le transistor reste ON tant que $V_{GE} = R_z \cdot i_3 > V_{th}$. La tension u_c diminue avec la constante de temps

$\tau' = \frac{R_1 \cdot R_g \cdot R_z}{R_1 \cdot R_g + R_1 \cdot R_z + R_z \cdot R_g} \cdot C_1$ vers la valeur finale $-\frac{N_3}{N_1}U_e$, la tension V_{GE} diminue avec la même constante de temps,

le transistor se bloque donc très rapidement dès que $V_{GE} < V_{th}$, la durée de cette phase est négligeable aussi les caractéristiques du montage ne dépendent presque pas de la tension de seuil V_{th} mais du courant de seuil $\frac{V_z}{R_z}$ fixé par le

choix de la résistance R_z . On note que le courant i_3 est forcément bien plus élevé que le courant minimale permettant

cette polarisation soit $i_3 = \frac{u_c + \frac{N_3}{N_1}U_e - V_z}{R_g} \gg i_{th} = \frac{V_z}{R_z}$

on aura donc $R_g \ll R_z$

1.3.2 Deuxième phase de fonctionnement: T OFF et D ON

On effectue le changement d'origine des temps $t' = t - t_{ON}$ pour que $t' = 0$ corresponde au début de cette phase de fonctionnement. T est OFF donc $i_1 = 0$, on a vu que l'on peut négliger i_3 et $j(0) = j_{\max} > 0$ la relation

$N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_2 - N_3 \cdot i_3 = \Re j$ impose donc $i_2 > 0$, la diode D est ON $u_2 = -U_s = N_2 \frac{dj}{dt}$ soit $j = -\frac{U_s}{N_2} t' + j_{\max}$

La diode D peut rester ON tant que $j = -\frac{U_s}{N_2} t' + j_{\max} > 0$ soit pendant la durée $t_D = \frac{N_2 \cdot j_{\max}}{U_s}$

On a aussi $u_1 = -\frac{N_1}{N_2}U_s$, et $u_3 = -\frac{N_3}{N_2}U_s < 0$ ce qui impose $i_3 < 0$, la diode zéner est polarisée en direct soit $V_{GE} = -V_d$

ce qui bloque le transistor. Le transistor reste bloqué tant que $i_3 < -\frac{V_d}{R_z} \approx 0$ avec $i_3 = \frac{u_c - \frac{N_3}{N_2}U_s + V_d}{R_g}$ soit

$u_c < \frac{N_3}{N_2}U_s - V_d$. La charge ($i_3 < 0$ conduit à une augmentation de la tension) de la capacité C_1 évolue selon

$$\text{l'équation (8) : } u_c + \mathbf{t} \frac{du_c}{dt} = \frac{R_g}{R_1 + R_g} U_e - \frac{R_1}{R_1 + R_g} \cdot \left[-\frac{N_3}{N_2} U_s + V_d \right]$$

On note $U_{\infty 1} = \frac{R_g}{R_1 + R_g} U_e + \frac{R_1}{R_1 + R_g} \cdot \left[\frac{N_3}{N_2} U_s - V_d \right]$ le second membre de l'équation différentielle.

La valeur initiale est celle obtenue à la fin de la première phase soit $u_c(t = t_{G1}) = -U_1 = u_c(t' = 0)$

(la capacité s'est déchargée précédemment la tension est donc négative) d'où : $u_c = -U_1 \cdot e^{-\frac{t'}{\mathbf{t}}} + U_{\infty 1} (1 - e^{-\frac{t'}{\mathbf{t}}})$

On note t_{G2} le temps pour lequel $u_c(t' = t_{G2}) = -V_d + \frac{N_3}{N_2}U_s$ soit :

$$u_c(t_{G2}) = -U_1 \cdot e^{-\frac{t_{G2}}{\mathbf{t}}} + U_{\infty 1} (1 - e^{-\frac{t_{G2}}{\mathbf{t}}}) = \frac{N_3}{N_2}U_s - V_d = U_2$$

$t_{G2} = \mathbf{t} \cdot \text{Log} \left[\frac{U_{\infty 1} + U_1}{U_{\infty 1} - U_2} \right]$ ce temps dépend de la valeur initiale $-U_1$.

La durée de cette phase (T OFF et D ON) est alors $t_{OFF} = \inf(t_D, t_{G2})$ En régime permanent le signal u_c évolue selon la figure 4.

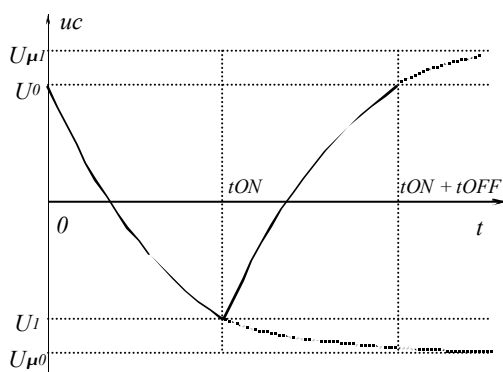


Figure 4 : Evolution de la tension u_c si $t_{G1} < t_C$

La tension du condensateur à la fin de la deuxième phase est égale à celle au début de la première phase, $u_c(t' = t_{OFF}) = U_0$

$U_0, U_1, t_{ON}, t_{OFF}$ sont liés par les deux relations :

$u_c(t' = t_{OFF}) = U_0$ et $u_c(t = t_{ON}) = -U_1$ soit :

$$u_c(t' = t_{OFF}) = -U_1 \cdot e^{-\frac{t_{OFF}}{\mathbf{t}}} + U_{\infty 1} (1 - e^{-\frac{t_{OFF}}{\mathbf{t}}}) = u_c(t = 0) = U_0$$

$$\text{et } u_c(t_{ON}) = U_0 \cdot e^{-\frac{t_{ON}}{\mathbf{t}}} - U_{\infty 0} (1 - e^{-\frac{t_{ON}}{\mathbf{t}}}) = -U_1 = u_c(t' = 0)$$

A la fin de cette phase le transistor sera rendu conducteur immédiatement (sans temps mort pendant lequel T OFF et D OFF et V_{GE} augmente jusqu'à V_z) si $u_c(t' = t_{OFF}) = U_0 > V_z$

Si $t_D > t_{G2} = t_{OFF}$ le flux est encore positif quand le transistor se bloque, la démagnétisation du transformateur est incomplète ce qui correspond à une mauvaise utilisation du matériau magnétique. On choisira les composants pour que la démagnétisation soit complète sans temps mort entre la magnétisation et la démagnétisation. L'évolution des signaux pendant le fonctionnement est donnée figure 5.

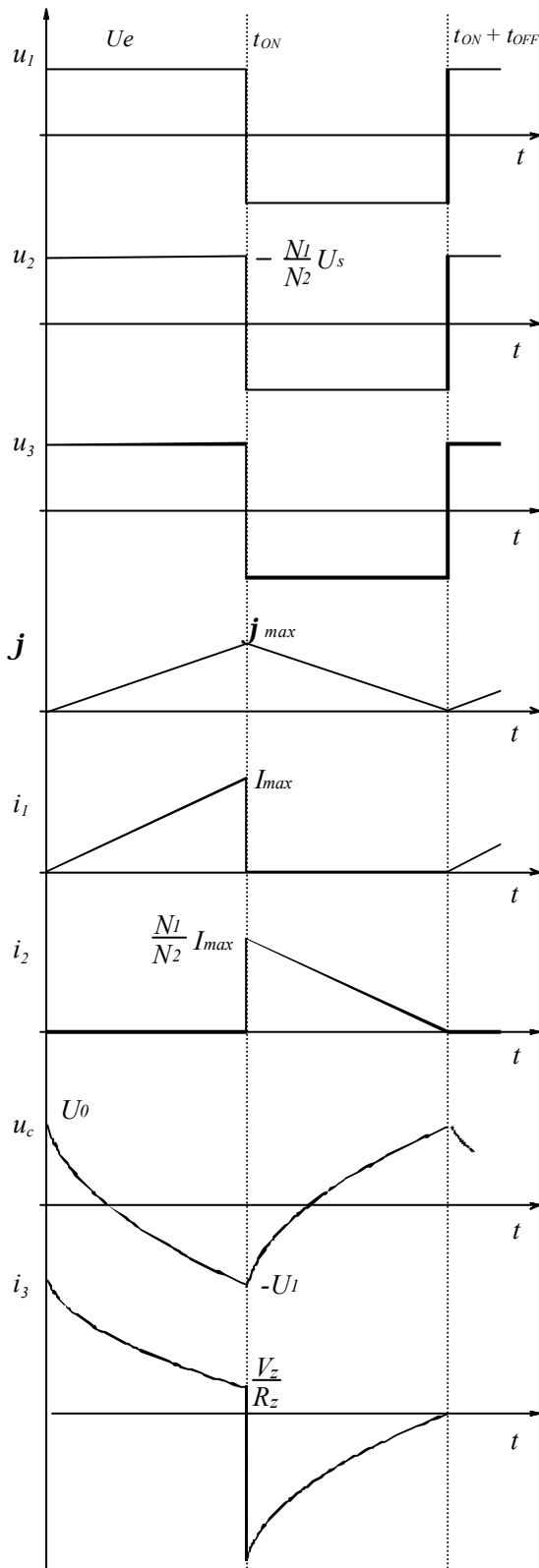


Figure 5 : Evolution des signaux (mode 1)

Pour que l'évolution de la figure 4 soit vérifiée il faut imposer $U_1 < U_{\infty 0}$ et $U_0 < U_{\infty 1}$ Pour

$$u_c(t_{G1}) = \left(1 + \frac{R_g}{R_z}\right) V_z - \frac{N_3}{N_1} U_e = -U_1$$

il vient :

$$U_1 = \frac{N_3}{N_1} U_e - \left(1 + \frac{R_g}{R_z}\right) V_z < \frac{R_1}{R_1 + R_g} \cdot \left[\frac{N_3}{N_1} U_e - V_z\right] - \frac{R_g}{R_1 + R_g} U_e$$

Ce qui impose : $\left(1 + \frac{N_3}{N_1}\right) U_e < \left(1 + \frac{R_1 + R_g}{R_z}\right) V_z$

Pour satisfaire facilement cette relation on pourra imposer $R_1 > R_z$. Comme on a vu aussi que

$R_z \gg R_g$ le rapport de transformation $\frac{N_3}{N_1}$

devra respecter la condition

$$\boxed{\left(1 + \frac{N_3}{N_1}\right) U_e < \left(1 + \frac{R_1}{R_z}\right) V_z}$$

1.4 Les 4 modes de fonctionnement du montage

Le montage possède (sans compter les modes où il existe des temps morts) 4 modes de fonctionnement selon les relations d'ordre entre t_{G1} et t_C d'une part et t_{G2} et t_D d'autre part.

Mode 1 $t_{ON} = t_{G1} < t_C$ et $t_{OFF} = t_D < t_{G2}$

Mode 2 $t_{ON} = t_{G1} < t_C$ et $t_{OFF} = t_{G2} < t_D$

Mode 3 $t_{ON} = t_C < t_{G1}$ et $t_{OFF} = t_D < t_{G2}$

Mode 4 $t_{ON} = t_C < t_{G1}$ et $t_{OFF} = t_{G2} < t_D$

Si $t_{ON} = t_{G1}$ (mode 1 et 2) le temps pendant lequel le transistor est ON est imposé par le circuit de grille ($R_z, R_1, C_1, V_z, R_g, U_e, N_1, N_2, N_3, U_s$)

Le flux maximum est fixé par ϕ_{max} et le courant maximum dans le collecteur du transistor

$$\text{par } I_{max} = \frac{U_e \cdot t_{ON}}{L_1}$$

Si $t_{ON} = t_C$ (mode 3 et 4) le temps pendant lequel le transistor est ON est imposé par les caractéristiques du transistor et l'inductance du primaire du transformateur $I_{max} = s.(V_z - V_{th})$ et $t_C = \frac{L_1 I_{max}}{U_e}$. Le flux maximum est fixé par

$\mathbf{j}_{max} = \frac{U_e}{N_1} . t_{ON}$. La capacité C_1 va se décharger jusqu'à une valeur $-U_1$ imposée par $t_{ON} = t_C$.

Si $t_{OFF} = t_D$ (mode 1 et 3) le temps pendant lequel le transistor est OFF (et la diode ON) est fixé par le circuit secondaire

$t_{OFF} = t_D = \frac{N_2 \mathbf{j}_{max}}{U_s}$ La capacité C_1 va se charger jusqu'à une valeur U_0 imposée par $t_{OFF} = t_D$,

Si $t_{OFF} = t_{G2}$ (mode 2 et 4) le temps pendant lequel le transistor est OFF est imposé par le circuit de grille ($R_1, C_1, V_z, R_g, U_e \dots$). Le flux dans le circuit magnétique n'est pas nul lors de la remise en conduction du transistor, la démagnétisation est incomplète.

Le fonctionnement souhaitable correspond à la démagnétisation complète (mode 1, 3) sans temps mort (éviter T et D simultanément OFF) ainsi on a une meilleure puissance volumique du transformateur.

Le flux maximum peut être imposé par les caractéristiques du transistor (mode 3, 4) qui sont variables d'un transistor à un autre et qui dépendent aussi de la température ou par le circuit de grille.

On dimensionnera le montage pour fonctionner en mode 1 ou 3 au régime nominal. Dans les deux cas t_{OFF} est fixé par le circuit secondaire $t_{OFF} = t_D = \frac{N_2 \mathbf{j}_{max}}{U_s}$. La capacité C_1 va se charger jusqu'à une valeur U_0 imposée par $t_{OFF} = t_D$ et pour éviter un temps mort il faut $U_0 > V_z$.

En mode 1 t_{ON} est imposé par le circuit de grille, le flux maximum est fixé par $\mathbf{j}_{max} = \frac{U_e}{N_1} t_{ON}$ et le courant maximum dans

le collecteur du transistor par $I_{max} = \frac{U_e}{L_1} t_{ON}$. A l'instant t_{ON} du blocage du transistor la capacité C_1 est chargée avec la

tension $u_c(t_{G1}) = (1 + \frac{R_g}{R_z}) . V_z - \frac{N_3}{N_1} U_e = -U_1$

En mode 3 le temps pendant lequel le transistor est ON est imposé par les caractéristiques du transistor et l'inductance du primaire du transformateur $I_{max} = s.(V_z - V_{th})$ et $t_{ON} = \frac{L_1 I_{max}}{U_e}$. Le flux maximum est fixé par $\mathbf{j}_{max} = \frac{U_e}{N_1} . t_{ON}$. La

capacité C_1 va se décharger jusqu'à une valeur $-U_1$ imposée par $t_{ON} = t_C$.

On remarque que lors du "démarrage" du montage la tension de sortie est initialement nulle alors on n'aura pas forcément (cela dépend de la capacité C) $t_{OFF} = t_D < t_{G2}$ on pourra obtenir transitoirement le mode 2.

2. Calcul des éléments du montage

On va déterminer les valeurs à donner aux composants pour satisfaire aux contraintes suivantes : fonctionnement en mode 1 ou 3, tension de sortie $U_s = 200 \text{ V}$, tension d'alimentation $U_e = 12 \text{ V}$, puissance $P = 10 \text{ W}$.

2.1 Tension de sortie

La tension de sortie s'établit de telle sorte que la tension moyenne sur une bobine soit nulle. On note $\langle x \rangle$ la

valeur moyenne du signal x. Soit $\langle u_1 \rangle = \frac{t_{ON} . U_e - t_{OFF} . \frac{N_1}{N_2} . U_s}{t_{ON} + t_{OFF}} = 0$ d'où : $U_s = \frac{t_{ON}}{t_{OFF}} . \frac{N_2}{N_1} . U_e$

2.2 Fréquence de fonctionnement en mode 1

La fréquence de fonctionnement est $f = \frac{1}{t_{ON} + t_{OFF}}$ dépend de la tension de sortie selon les quatre équations suivantes:

$$t_{ON} = t \cdot \text{Log} \left[\frac{U_{\infty 0} + U_0}{U_{\infty 0} - U_1} \right] \quad t_{OFF} = \frac{N_2 \cdot \mathbf{j}_{\max}}{U_s};$$

$$\mathbf{j}_{\max} = \frac{U_e}{N_1} \cdot t_{ON} \quad t_{OFF} = t \cdot \text{Log} \left[\frac{U_{\infty 1} + U_1}{U_{\infty 1} - U_0} \right] \Leftrightarrow U_0 = -U_1 \cdot e^{-\frac{t_{OFF}}{t}} + U_{\infty 1} (1 - e^{-\frac{t_{OFF}}{t}})$$

On a posé : $t = \frac{R_g \cdot R_1}{R_g + R_1} \cdot C_1$ $-U_{\infty 0} = \frac{R_g}{R_1 + R_g} U_e - \frac{R_1}{R_1 + R_g} \cdot \left[\frac{N_3}{N_1} \cdot U_e - V_z \right]$

$$-U_1 = \left(1 + \frac{R_g}{R_z}\right) V_z - \frac{N_3}{N_1} U_e \quad U_{\infty 1} = \frac{R_g}{R_1 + R_g} U_e + \frac{R_1}{R_1 + R_g} \cdot \left[\frac{N_3}{N_2} \cdot U_s - V_d \right]$$

Soit 4 équations et 4 inconnues t_{ON} , t_{OFF} , U_0 , \mathbf{j}_{\max} qui sont fortement liées (les quatre constantes $U_{\infty 0}$, $U_{\infty 1}$, U_1 , t ne sont pas de inconnues car elles s'expriment aisément en fonction des éléments du montage). Le temps t_{ON} fixe le flux maximum \mathbf{j}_{\max} et dépend de U_0 . Le flux \mathbf{j}_{\max} fixe le temps t_{OFF} lequel impose la tension U_0 !

On ne peut pas exprimer les temps t_{ON} et t_{OFF} par une expression simple. En pratique pour dimensionner les éléments du montage on souhaite imposer la fréquence de fonctionnement $f = \frac{1}{t_{ON} + t_{OFF}}$ et le rapport cyclique $\frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}}$ qui ne doit être ni proche de 0 ni de 1 afin que le transistor et la diode soient également utilisés c'est à dire qu'ils soient "ON" pendant des durées comparables. Par exemple on fixe $a = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} \approx 0.5$ (soit $t_{ON} \approx t_{OFF}$).

2.3 Fréquence de fonctionnement en mode 3

Le courant maximum est imposé $I_{\max} = s \cdot (V_z - V_{th})$ d'où $t_{ON} = \frac{L_1 \cdot I_{\max}}{U_e}$ et $\mathbf{j}_{\max} = \frac{U_e}{N_1} \cdot t_{ON} \cdot t_{OFF} = \frac{N_2 \cdot \mathbf{j}_{\max}}{U_s}$ d'où

$$U_s = \frac{t_{ON}}{t_{OFF}} \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot U_e \quad \text{et} \quad f = \frac{1}{t_{ON} + t_{OFF}} = \frac{1}{t_{ON} \left(1 + \frac{N_2 \cdot U_e}{N_1 \cdot U_s}\right)} = \frac{U_e}{L_1 \cdot I_{\max} \left(1 + \frac{N_2 \cdot U_e}{N_1 \cdot U_s}\right)}$$

La fréquence augmente si la tension d'entrée augmente.

2.4 Puissance du convertisseur

On néglige les pertes du convertisseur et la puissance nécessaire à la commande de grille (courant dans R_1 négligé) la puissance P , fournie à la charge sous la tension U_s est égale à celle fournie par l'alimentation sous la tension U_e . Soit : $P = \langle U_e \cdot i_1 \rangle = U_s \cdot I_s$

Le courant moyen $\langle i_1 \rangle$ s'exprime (cf. figure 5) $\langle i_1 \rangle = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} \cdot \frac{I_{\max}}{2}$ et $I_{\max} = \frac{U_e}{L_1} \cdot t_{ON}$ d'où

$$\langle i_1 \rangle = \frac{t_{ON}^2}{t_{ON} + t_{OFF}} \cdot \frac{U_e}{2 \cdot L_1} \quad \text{et} \quad P = U_e \langle i_1 \rangle = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} \cdot \frac{U_e \cdot I_{\max}}{2} = \frac{t_{ON}^2}{t_{ON} + t_{OFF}} \cdot \frac{U_e^2}{2 \cdot L_1}$$

Les temps t_{ON} et t_{OFF} étant imposés la puissance est constante $P = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} \cdot \frac{U_e \cdot I_{\max}}{2} = U_s \cdot I_s$ Le montage ne peut pas fonctionner à vide ($U_s \rightarrow \infty$ si $I_s \rightarrow 0$)

2.5 Application numérique

2.5.1 Choix du transistor et de la diode

On impose le mode 3 et $t_{ON} \approx t_{OFF}$ et $f = \frac{1}{t_{ON} + t_{OFF}} \approx 50 \text{ kHz}$ soit $t_{ON} \approx t_{OFF} = 10 \mu\text{s}$

L'expression $U_s = \frac{t_{ON}}{t_{OFF}} \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot U_e$ conduit à $m = \frac{N_2}{N_1} \approx \frac{U_s}{U_e} \approx 16.7$. A l'état bloqué le transistor devra supporter la tension

$V_{CE} = U_e + \frac{U_s}{m} \approx 24 \text{ V}$ et la diode la tension $V_{KA} = U_s + m \cdot U_e \approx 400 \text{ V}$

La puissance est imposée $P = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} \cdot \frac{U_e \cdot I_{\max}}{2} = \frac{t_{ON}^2}{t_{ON} + t_{OFF}} \cdot \frac{U_e^2}{2 \cdot L_1} = 10 \text{ W}$ on déduit $I_{\max} \approx \frac{4 \cdot P}{U_e} = 3.4 \text{ A}$. Cette valeur est fixée par les paramètres du transistor et de la diode zéner. ($I_{\max} = s \cdot (V_z - V_{th})$). Le courant maximum dans la diode $I_{2\max}$ est tel que $N_1 \cdot I_{\max} = N_2 \cdot I_{2\max}$ soit $I_{2\max} = \frac{N_1 \cdot I_{\max}}{N_2} = \frac{I_{\max}}{m} \approx 200 \text{ mA}$. Ces valeurs permettent de choisir le transistor et la diode.

2.5.2 Dimensionnement du transformateur

L'expression de la puissance $P = \frac{t_{ON} \cdot U_e^2}{4 \cdot L_1}$ conduit à $L_1 \approx \frac{t_{ON} \cdot U_e^2}{4 \cdot P} = 36 \mu\text{H}$

Le flux maximum dans le transformateur est alors fixé par : $N_1 \cdot \mathbf{j}_{\max} = L_1 \cdot I_{\max} = U_e \cdot t_{ON} = 120 \mu\text{Wb}$.

Ayant choisi un type de ferrite on connaît la valeur maximale admissible du champ magnétique, par exemple $B_{\max} \approx 0.3 \text{ T}$ (pour le matériau 3C85). L'énergie magnétique maximale à stocker est $W = \frac{1}{2} L_1 \cdot I_{\max}^2 = 208 \mu\text{J}$. Le stockage de cette énergie nécessite un entrefer de volume V (on néglige l'énergie magnétique stockée dans le matériau magnétique devant celle stockée dans l'entrefer).

La densité volumique d'énergie magnétique dans l'entrefer est $\frac{dW}{dV} = \frac{B^2}{2 \cdot \mathbf{m}}$ d'où le volume

$V = \frac{2 \cdot \mathbf{m} \cdot W}{B^2} = \frac{\mathbf{m} \cdot L_1 \cdot I_{\max}^2}{B_{\max}^2} \approx 5.6 \text{ mm}^3$. Ceci permet de choisir la section S du circuit magnétique et l'épaisseur e de

l'entrefer (on impose $e = 0.05 \sqrt{S} \ll \sqrt{S}$ pour limiter les fuites magnétiques) $V = S \cdot e = 0.05 S^{1.5}$ d'où $S \approx 23 \text{ mm}^2$ et $e \approx 0.25 \text{ mm}$ $\mathbf{j}_{\max} = S \cdot B_{\max} \approx 7 \mu\text{Wb}$ d'où $N_1 = \frac{L_1 \cdot I_{\max}}{\mathbf{j}_{\max}} = 18 \text{ spires}$ (fil de diamètre 0.8 mm environ) et

$N_2 = m \cdot N_1 = 300 \text{ spires}$ (fil de diamètre 0.2 mm)

En pratique on choisit un circuit magnétique commercialisé dont les dimensions sont proches de celles déterminées ci-dessus et il convient d'adapter les nombres de spires en tenant compte des caractéristiques réelles du circuit magnétique choisi.

2.5.3 Calcul des éléments du circuit de grille

Il reste à choisir les composants du circuit de grille qui doit vérifier $(1 + \frac{N_2}{N_1}) U_e < (1 + \frac{R_1}{R_z}) V_z$ et $R_1 > R_z \gg R_g$ et aussi

$u_{c0} = \frac{R_z}{R_1 + R_g + R_z} U_e > V_z$ pour permettre la saturation initiale du transistor.

Le seuil de conduction du transistor, V_{th} varie de 2 à 4 V, on choisit la diode zéner pour saturer le transistor, $V_z = 6.8 \text{ V} > V_{th}$ convient. La résistance R_z fixe le courant $i_{th} = \frac{V_z}{R_z}$ minimum assurant la polarisation de la diode zéner.

On impose le courant maximum dans la diode zéner $i_3 = \frac{U_1 + \frac{N_3}{N_2}U_s - V_d}{R_g} \approx 20 \text{ mA}$, le choix $i_{th} = 0,5 \text{ mA} \ll 20 \text{ mA}$

est alors convenable d'où $R_z = \frac{V_z}{i_{th}} \approx 12 \text{ k}\Omega$

Quand le transistor est OFF le courant dans la diode zéner est imposé à 20 mA. Compte tenu de $t_{ON} \approx t_{OFF}$ on a

$$\frac{N_3}{N_2}U_s = \frac{N_3}{N_1}U_e \text{ et } -U_1 = (1 + \frac{R_g}{R_z})V_z - \frac{N_3}{N_1}U_e \approx V_z - \frac{N_3}{N_1}U_e \quad (\text{avec } R_z \gg R_g \text{ et en négligeant aussi } V_d = 0.7 \text{ V}) \text{ il}$$

$$\text{vient : } i_{3\max} \approx \frac{\frac{2 \cdot N_3}{N_1}U_e - V_z}{R_g} \approx 20 \text{ mA}$$

Quand le transistor est ON le courant dans la diode zéner doit aussi être limité : $i_3 \approx \frac{U_0 + \frac{N_3}{N_1}U_e - V_z}{R_g}$ (on

rappelle $i_{th} = 0,5 \text{ mA} \ll i_{3\max}$). De plus il faut $U_0 > V_{th}$ pour assurer la mise ON du transistor à la fin de la phase de blocage. Il faut donc déterminer la valeur de la tension U_0 qui dans notre cas est solution de :

$$t_{ON} = \mathbf{t} \cdot \text{Log}\left[\frac{U_{\infty 0} + U_0}{U_{\infty 0} - U_1}\right] \approx t_{OFF} = \mathbf{t} \cdot \text{Log}\left[\frac{U_{\infty 1} + U_1}{U_{\infty 1} - U_0}\right] \quad \frac{U_{\infty 0} + U_0}{U_{\infty 0} - U_1} \approx \frac{U_{\infty 1} + U_1}{U_{\infty 1} - U_0};$$

$$(U_{\infty 0} + U_0)(U_{\infty 1} - U_0) \approx (U_{\infty 0} - U_1)(U_{\infty 1} + U_1)$$

On calcule les valeurs auxiliaires

$$U_{\infty 0} = \frac{R_1}{R_1 + R_g} \cdot \left[\frac{N_3}{N_1}U_e - V_z\right] - \frac{R_g}{R_1 + R_g}U_e \approx \frac{N_3}{N_1}U_e - V_z \quad U_1 = \frac{N_3}{N_1}U_e - \left(1 + \frac{R_g}{R_z}\right)V_z$$

$$U_{\infty 1} = \frac{R_g}{R_1 + R_g}U_e + \frac{R_1}{R_1 + R_g} \cdot \left[\frac{N_3}{N_2}U_s - V_d\right] \approx \frac{N_3}{N_2}U_s = \frac{N_3}{N_1}U_e$$

$$U_{\infty 1} + U_1 \approx \frac{N_3}{N_2}U_s + \frac{N_3}{N_1}U_e - \left(1 + \frac{R_g}{R_z}\right)V_z \approx \frac{2 \cdot N_3}{N_1}U_e - V_z$$

$$U_{\infty 0} - U_1 \approx \frac{R_g}{R_z}V_z; \text{ compte tenu de } R_g \ll R_z \text{ il vient : } U_{\infty 0} \approx U_1$$

$$\text{d'où } (U_{\infty 0} + U_0)(U_{\infty 1} - U_0) \approx (U_{\infty 0} - U_1)(U_{\infty 1} + U_1) \approx 0 \text{ soit } U_0 \approx U_{\infty 1} = \frac{N_3}{N_2}U_s = \frac{N_3}{N_1}U_e$$

La condition $U_0 \approx \frac{N_3}{N_1}U_e > V_{th}$ peut être satisfaite en prenant $\frac{N_3}{N_1} = 1$ avec $U_e = 12 \text{ V}$

On bobinera $N_3 = N_1 = 18 \text{ spires}$ de fil fin.

alors $\frac{N_3}{N_2}U_s = \frac{N_3}{N_1}U_e \approx 12 \text{ V}$, d'où $i_{3\max} \approx \frac{\frac{2 \cdot N_3}{N_1}U_e - V_z}{R_g} \approx 20 \text{ mA}$ conduit à $R_g \approx 1 \text{ k}\Omega$ et

$$U_1 \approx -V_z + \frac{N_3}{N_1}U_e \approx 5.2 \text{ V}. \text{ On vérifie que } R_z = 12 \text{ k}\Omega \gg R_g = 1 \text{ k}\Omega.$$

La condition $(1 + \frac{N_3}{N_1})U_e < (1 + \frac{R_1 + R_g}{R_z})V_z$ sera vérifiée en choisissant $R_1 > R_z \gg R_g$

On a alors numériquement compte tenu de $R_1 > R_z \gg R_g$: $-U_{\infty 0} \approx -\frac{N_3}{N_1}U_e + V_z \approx -5.2 \text{ V}$;

$$U_{\infty 1} \approx \frac{N_3}{N_2}U_s \approx 12 \text{ V}; \quad U_0 \approx U_{\infty 1} = 12 \text{ V}; \quad U_1 \approx -V_z + \frac{N_3}{N_1}U_e \approx 5.2 \text{ V}$$

L'expression $t_{ON} = t \cdot \text{Log}\left[\frac{U_{\infty 0} + U_0}{U_{\infty 0} - U_1}\right]$ impose de calculer sans approximation le terme

$U_{\infty 0} - U_1$, il vient $U_{\infty 0} - U_1 \approx \frac{R_g}{R_z} \cdot V_z \approx 0.56 \text{ V}$, soit $t_{ON} \approx 3,4 \cdot t$ et $t \approx R_g \cdot C_1 \approx \frac{t_{ON}}{3,4} \approx 3 \mu\text{s}$ d'où $C_1 \approx 3 \text{ nF}$.

La résistance R_1 est sans grande influence elle doit simplement vérifier $R_1 > R_z = 12 \text{ k}\Omega$. Elle doit permettre de rendre rapidement conducteur le transistor lors de la mise sous tension du montage, la constante de temps $\tau_1 = R_1 C_1$ ne doit pas être trop élevée, on prendra $R_1 = 12 \text{ k}\Omega$ ce qui permet la saturation initiale du transistor.

Les calculs conduits ci-dessus ne sont effectués que pour le point de fonctionnement nominal. Si la charge change, la tension de sortie sera modifiée ainsi que la fréquence de découpage, il en sera de même lors de la mise sous tension du montage.

2.5.4 Capacité de sortie

Quand le transistor est ON, la diode D est OFF. C'est la décharge de la capacité C qui maintient la tension de sortie. La capacité fournit le courant $I_s = \frac{P}{U_s} \approx 50 \text{ mA}$ pendant le temps $t_{ON} \approx 10 \mu\text{s}$, la chute de tension de sortie est

$$\Delta U_s = \frac{I_s \cdot t_{ON}}{C}, \text{ on impose } \Delta U_s < \frac{U_s}{1000} \ll U_s \text{ soit } C \gg \frac{100 \cdot I_s \cdot t_{ON}}{U_s} \approx 2.50 \mu\text{F}$$

2.5.5 Circuit d'aide à la commutation du transistor $R_2 - C_2$

On a considéré dans l'étude précédente que le transformateur est parfait. En réalité il présente des inductances de fuite qui sont en série avec le collecteur du transistor (il existe également les inductances de câblage). Quand on bloque le transistor en l'absence du circuit $R_2 - C_2$, l'énergie magnétique due au fuite ne peut s'évacuer que dans le transistor, elle conduit à une augmentation de la tension de collecteur V_{CE} jusqu'au régime d'avalanche du transistor. Le rôle du circuit $R_2 - C_2$ permet d'éviter ceci. Pour l'étude de la commutation du transistor le schéma est conforme à la figure 6.

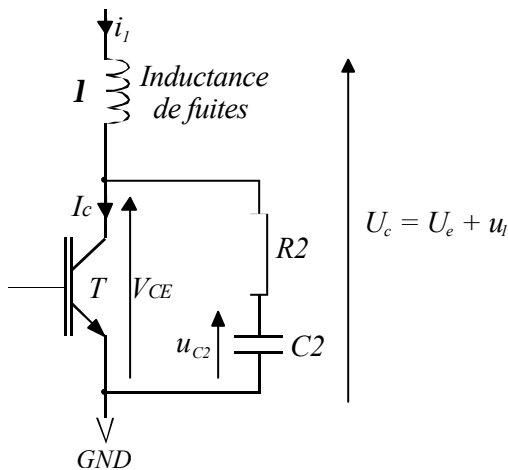


Figure 6 :

Prise en compte de l'inductance de fuite lors du blocage du transistor

Initialement le transistor est ON, $i_1 = I_c = I_{\text{max}}$, $V_{CE} = u_{c2} = U_c \approx 0$. On suppose le blocage du transistor instantané alors $I_c = 0$ et

$$U_c = U_e + u_1 = U_{OFF} = U_e + \frac{N_1}{N_2} U_s.$$

On cherche alors l'évolution de la tension V_{CE} . Le circuit $R_2 - C_2 - I$ est soumis à un échelon de tension U_c qui varie brutalement de 0 à $U_{OFF} = U_e + \frac{N_1}{N_2} U_s$. La fonction de transfert de ce circuit du second ordre est

$$\frac{u_{c2}}{U_c} = F(p) = \frac{1}{1 + R_2 \cdot C_2 \cdot p + I \cdot C_2 \cdot p^2} = \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot m \cdot p}{\omega_0} + \frac{p^2}{\omega_0^2}}$$

(p désigne l'opérateur de Laplace, $m = \frac{R_2 \cdot \sqrt{C_2}}{2\sqrt{I}}$ est le coefficient d'amortissement du circuit et $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{I \cdot C_2}}$ la pulsation propre).

Le courant évolue selon la relation $i_1 = C_2 \frac{du_{c2}}{dt}$ et la tension $V_{CE} = R_2 i_1 + u_{c2}$

Afin d'éviter l'existence d'oscillations indésirables on impose que le coefficient d'amortissement soit $m > 1$ d'où $R_2 \cdot C_2^2 > 4L \Leftrightarrow R_2 > 2 \cdot \sqrt{\frac{L}{C_2}}$

Dès que le transistor est bloqué le courant $i_1 = I_{\max}$ charge la capacité C_2 via la résistance R_2 . Au début de la commutation on a $V_{CE} = R_2 \cdot I_{\max}$ et à la fin quand le courant i_1 s'est annulé la capacité est alors chargée avec la tension $u_{c2} = U_{off}$. L'énergie magnétique $W = \frac{1}{2} L \cdot I_{\max}^2$ est pour une partie transférée dans la capacité C_2 et pour une autre partie été dissipée dans la résistance R_2 . Si on néglige cette partie la tension aux bornes de C_2 à la fin de la commutation serait telle que $W = \frac{1}{2} L \cdot I_{\max}^2 = \frac{1}{2} C_2 \cdot u_{c2}^2$ soit $u_{c2} = \sqrt{\frac{L}{C_2}} \cdot I_{\max}$. Du fait que $R_2 > 2 \cdot \sqrt{\frac{L}{C_2}}$ la tension la plus élevée aux bornes du transistor est obtenue au début de la commutation et non à la fin soit, $V_{CE} = R_2 \cdot I_{\max}$ qui doit rester inférieure à la tension maximale supportable par le transistor $V_{CE\max}$ sinon le régime d'avalanche surviendra. Il est à noté que ce régime est acceptable si l'énergie dissipée dans le transistor ne conduit pas à un échauffement excessif.

La durée de ce régime transitoire est le temps de réponse à l'échelon de la fonction de transfert $F(p)$, $t_r \approx \frac{6 \cdot m}{\omega_0} = 3R_2 C_2$. Il faut que $t_r \approx 3R_2 \cdot C_2 \ll t_{OFF}$

Quand le transistor sera à nouveau rendu conducteur la capacité C_2 va se décharger à travers le transistor et la résistance R_2 , le courant de décharge sera $I_d \approx \frac{U_{off}}{R_2}$ il faut limiter ce courant à une valeur inférieure à la valeur maximale admissible, $I_{c\max}$ du transistor. La puissance dissipée par R_2 est celle liée à la charge et à la décharge de la capacité C_2 à la fréquence f . Lors de la charge on peut estimer que l'énergie $W_f = \frac{1}{2} L \cdot I_{\max}^2$, de l'inductance de fuite est entièrement dissipée dans la résistance (en réalité une partie est stockée dans la capacité C_2) et il faut également dissiper l'énergie $W_2 = \frac{1}{2} C_2 \cdot U_{off}^2$ pour charger la capacité jusqu'à la tension U_{off} (l'énergie dissipée dans la résistance est égale à celle stockée dans la capacité lors de la charge d'un condensateur quelle que soit la valeur de la résistance en série). Lors de la décharge toute l'énergie $W_2 = \frac{1}{2} C_2 \cdot U_{off}^2$ de la capacité est dissipée dans la résistance, soit $P_2 \leq f[W_f + 2W_2] = f \cdot [\frac{1}{2} L I_{\max}^2 + C_2 \cdot U_{off}^2]$ Il faut choisir une faible capacité pour limiter cette puissance. La résistance R_2 doit être choisie pour respecter ces contraintes :

$R_2 \cdot I_{\max} < V_{CE\max}$, $I_d \approx \frac{U_{off}}{R_2} < I_{c\max}$, $3 \frac{R_2}{L} \ll t_{OFF}$ Dans notre cas, on a choisi un transistor IRG4BC20W caractérisé

par $V_{CE\max} = 600 V$ et $I_{c\max} = 6.5 A$ en continu ou $I_{c\max} = 50 A$ en régime impulsionnel d'où $R_2 < \frac{V_{CE\max}}{I_{\max}} \approx 200 \Omega$,

$R_2 > \frac{U_{off}}{I_{c\max}} \approx \frac{24}{50} \approx 0,5 \Omega$. On choisit $R_2 = 200 \Omega$ pour réaliser facilement $R_2 > 2 \cdot \sqrt{\frac{L}{C_2}}$ avec une faible capacité et

aussi pour limiter la puissance dissipée dans la résistance.

L'inductance de fuite due au câblage est délicate à évaluer (on estime $10 nH / cm$ cf. annexe).

On peut estimer le coefficient de fuite du transformateur à 10% (dans le pire des cas) soit $I < 0,1 L_1 \approx 3 \mu H$.

La capacité C_2 doit respecter $C_2 > 4 \cdot \frac{L}{R_2^2} \approx 300 pF$ La durée du régime transitoire est alors

$t_r = 3R_2 \cdot C_2 \approx 180 ns \ll t_{OFF} = 10 \mu s$ la puissance dissipée dans la résistance R_2 est alors

$P_2 < f \cdot [\frac{1}{2} I_{\max}^2 + C_2 \cdot U_{\text{off}}^2] \approx 120 \text{ mW}$ ce qui donne l'ordre de grandeur (C'est l'énergie magnétique qui est prépondérante)

2.6 Remarque sur la mise sous tension du montage

A la mise sous tension les capacités sont déchargées, soit initialement $u_c(t=0) = 0$ et $U_s = 0$. Le transistor est bloqué mais la capacité C_1 se charge à travers la résistance R_1 jusqu'à la tension $u_{c0} = \frac{R_z}{R_z + R_g + R_1} U_e \approx 6 \text{ V}$ cette valeur est supérieure au seuil du transistor, la tension $V_{GE} = u_c$ augmente et le transistor devient saturé dès que $V_{GE} = u_c > V_{th}$. Le courant i_1 augmente selon la relation $i_1 = \frac{U_e}{L_1} t$, le courant i_3 devient positif et diminue selon

$i_3 = \frac{u_c + \frac{N_3}{N_1} U_e - V_z}{R_g} > \frac{V_z}{R_z}$, le transistor deviendra OFF quand $i_3 = \frac{V_z}{R_z}$ soit $u_c = V_z (1 + \frac{R_g}{R_z}) - \frac{N_3}{N_1} U_e < 0$. A cet

instant la tension de sortie U_s est toujours nulle mais l'énergie $W = \frac{1}{2} L_1 i_1^2$ doit s'évacuer en forçant un courant $i_2 > 0$,

la diode D est ON, la capacité C se charge et la tension de sortie augmente. Le courant i_3 devient négatif et augmente

selon $i_3 = \frac{u_c + \frac{N_3}{N_2} U_s + V_d}{R_g} \approx \frac{u_c + V_d}{R_g} < 0$, le transistor redevient ON quand $i_3 = -\frac{V_d}{R_z}$. On constate ainsi que

l'oscillation survient même si la tension de sortie est **nulle si les conditions** $u_c = V_z (1 + \frac{R_g}{R_z}) - \frac{N_3}{N_1} U_e < 0$ et

$\frac{R_z}{R_z + R_g + R_1} U_e > V_{th}$ **sont satisfaites**. Il faut impérativement satisfaire ces relations sinon l'oscillation peut ne pas

survenir, le transistor resterait conducteur en permanence avec la tension $V_{CE} = U_e$ ou ne se saturerait jamais!

3. Simulation et résultats expérimentaux

3.1 Simulation

La figure 7 donne l'évolution des signaux pour les valeurs de composant déterminées ci-dessus.

On observe que la tension de sortie la fréquence de fonctionnement augmentent pendant ce régime transitoire.

La figure 8 met en évidence l'influence du temps de recouvrement de la diode D. Quand le transistor T est rendu conducteur la diode D qui vient de se bloquer mais possède encore des charges à évacuer conduit en inverse pendant quelque μs . Il faut employer une diode rapide.

La période de fonctionnement est de 30 μs et non pas 20 μs comme prévu. Cet écart est dû à la valeur maximale du courant (environ 5 A pour la simulation au lieu 3.4 A comme prévu. Cette valeur dépend des caractéristiques du transistor : tension de seuil et transconductance.

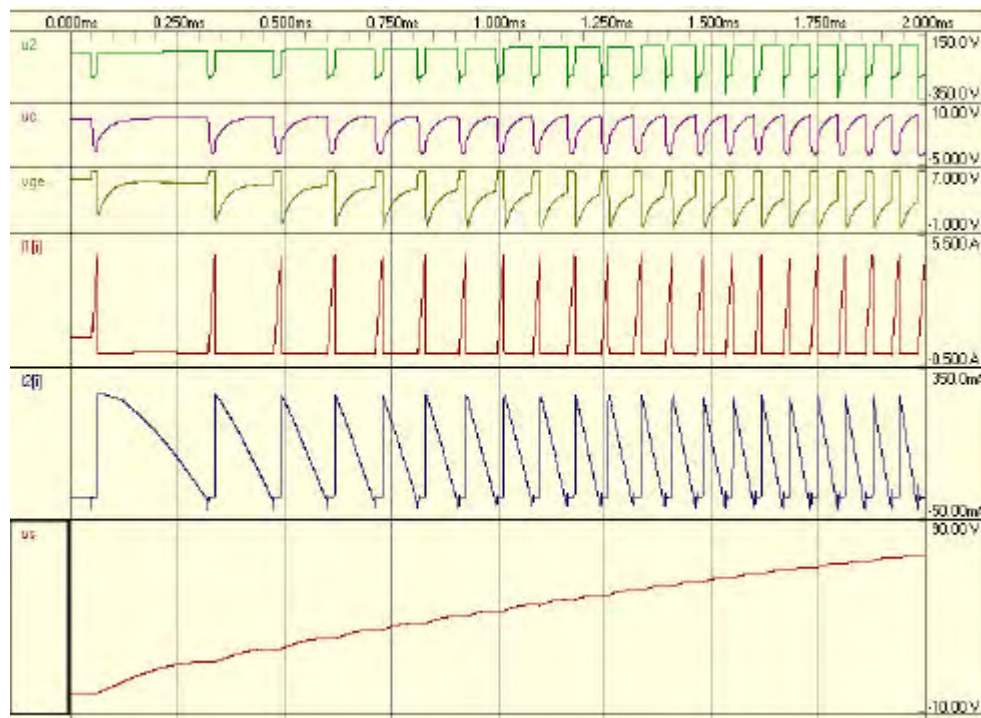


Figure 7 : Evolution des signaux lors de la mise sous tension du montage

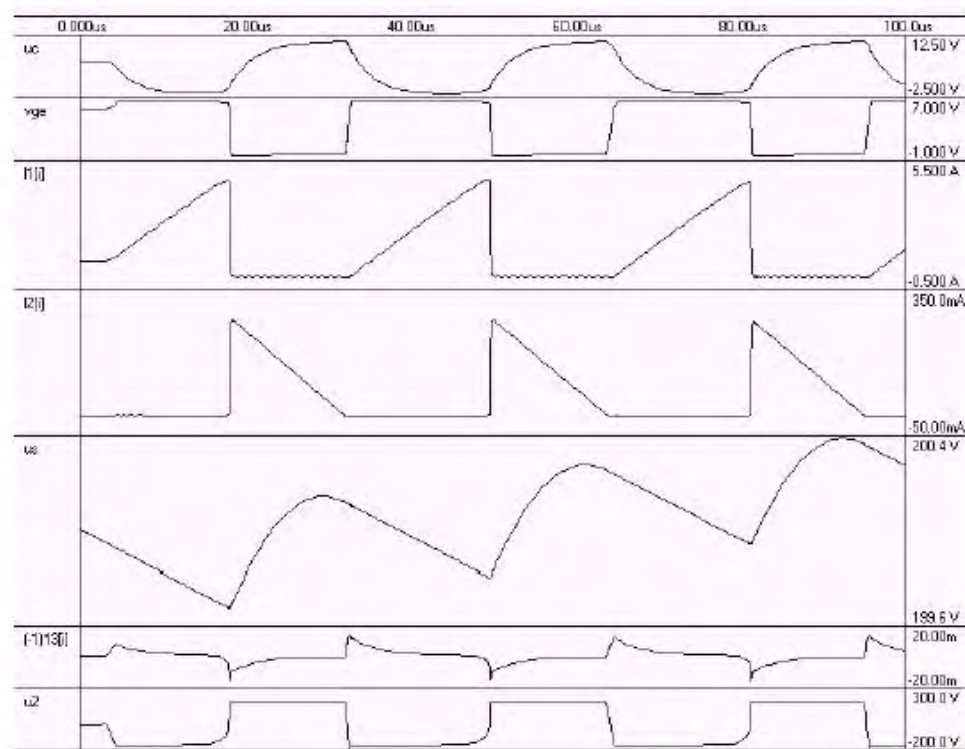


Figure 8 : Evolution des signaux en régime permanent

3.2 Résultats expérimentaux

Le transformateur réalisé ne possède pas exactement les caractéristiques théoriques. De plus les caractéristiques du transistor : seuil et transconductance sont variables d'un composant à l'autre ce qui modifie fortement la puissance et la fréquence de fonctionnement. Il est tout à fait normal que les performances obtenues en pratique soit différentes de celles prédéterminées. La figure 9 présente la réalisation pédagogique réalisée, le câblage est en fil volant ce qui présente le pire des cas pour les inductances parasites. La maquette réalisée permet de tester très rapidement différentes structures de convertisseur auto-oscillant, c'est pourquoi elle comporte des composants inutilisés ici. Sur une charge

$R=2\text{ k}\Omega$ (puissance délivrée $P\approx 20\text{W}$) on obtient la tension de sortie $U_s = 195\text{V}$ et le courant maximum dans le transistor (fixé par ses caractéristiques) est $I_{\text{max}} = 10\text{A}$. La fréquence d'oscillation s'établit alors à $f \approx 30\text{ kHz}$. Ces valeurs dépendent de la résistance de charge. La figure 10 présente l'évolution des signaux de grille du transistor (tension u_c et tension de grille V_{GE}). La figure 11 les signaux au primaire du transformateur (courant i_1 et tension u_1). La figure 12 présente les signaux au secondaire du transformateur (courant i_2 et tension u_2).

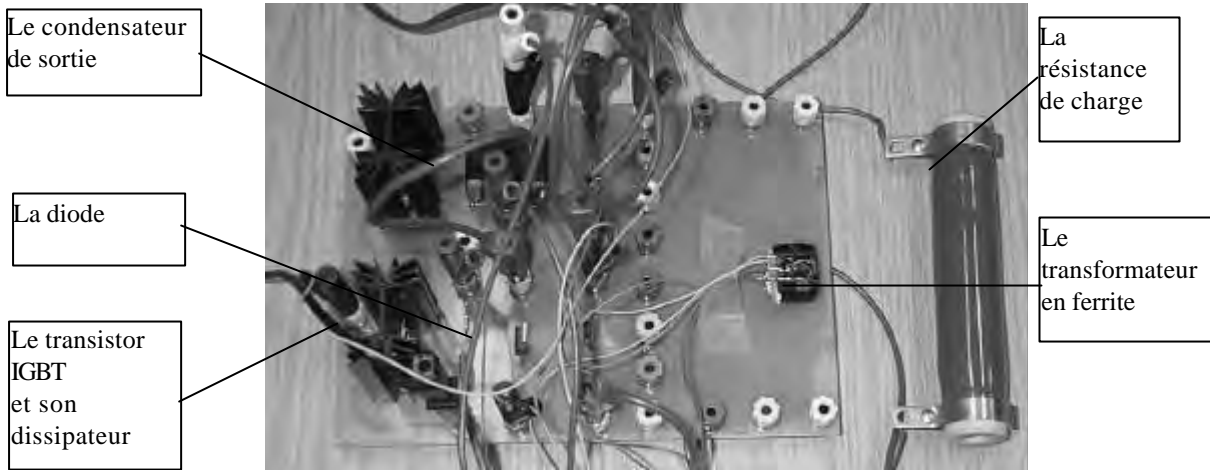


Figure 9 : La maquette pédagogique réalisée

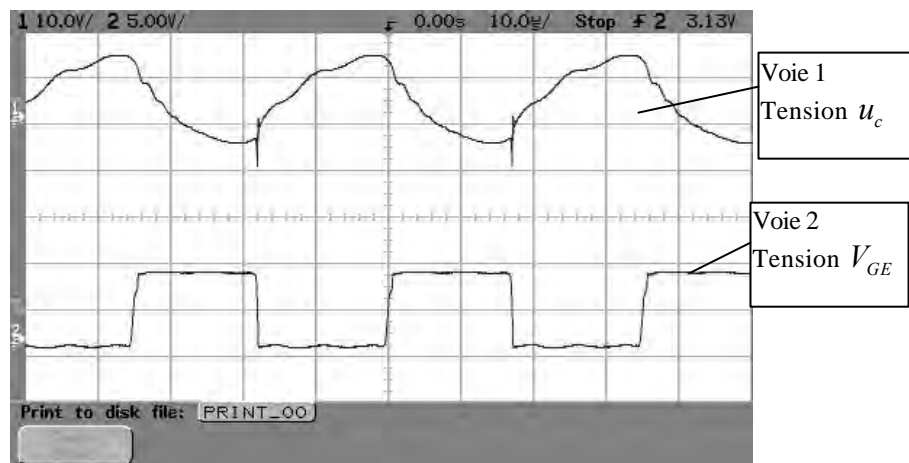


Figure 10 : Evolution des signaux de grille du transistor (u_c et V_{GE})

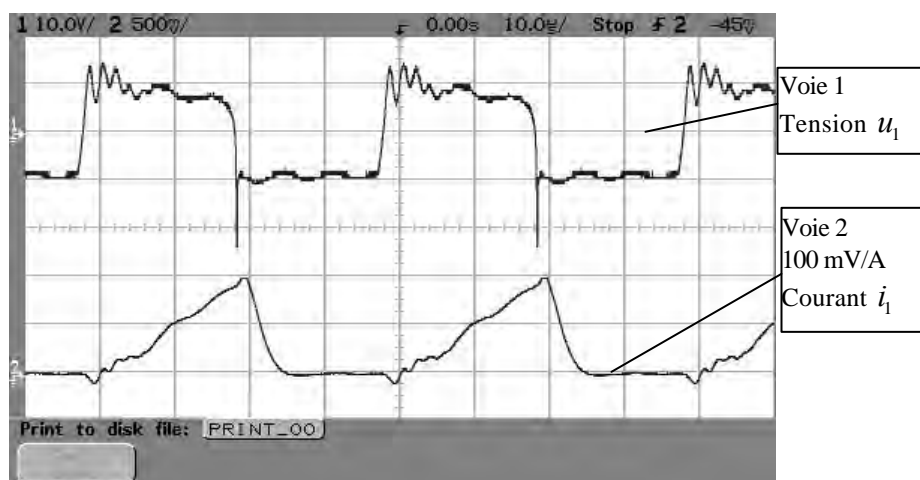
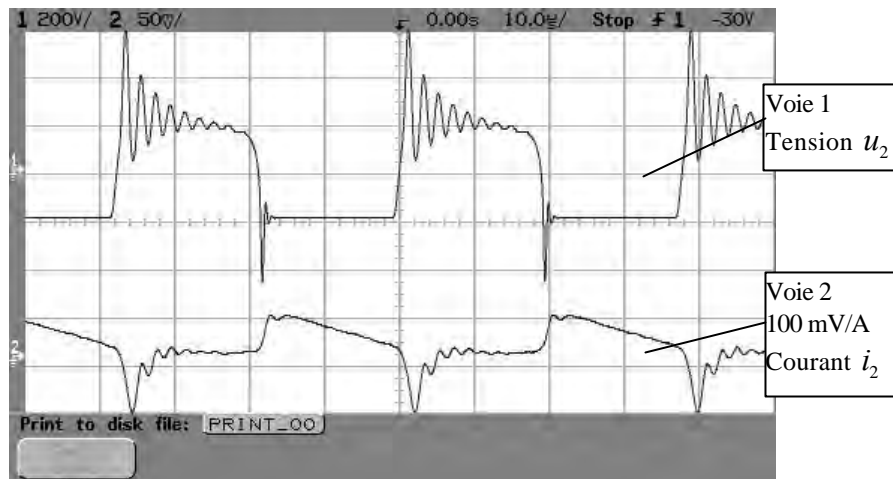


Figure 11 : Evolution des signaux au primaire (i_1 et u_1)

Figure 12 Evolution des signaux au secondaire (i_2 et u_2)

Les signaux expérimentaux présentent des oscillations inattendues mais en fait prévisibles du fait du câblage "volant". Néanmoins le fonctionnement est conforme à celui attendu (cf. figure 5). La fréquence est de 30 kHz environ due surtout à la valeur de l'inductance primaire du transformateur. (ici $20\ \mu\text{H}$ environ) que l'on peut régler en ajustant l'entrefer.

Conclusion

Le montage présenté constitue un exercice complet d'électronique de puissance. Le dimensionnement de tous les composants est tout à fait accessible à des étudiants de niveau Bac+2 (IUT ou BTS). Le test est ensuite facilité par la simplicité du montage. Enfin ce montage présente un aspect "auto-protecteur" très intéressant : le courant au primaire du transistor ne peut pas dépasser une valeur maximale ce qui évite la destruction du transistor par surintensité.

Ce montage est assez motivant pour les étudiants qui sont sensibles à l'aspect "survolteur" : obtenir une forte tension à partir d'une tension faible est toujours satisfaisant. Si on se limite à une puissance de quelques dizaines de watt le transformateur nécessaire est de faible volume et le bobinage "à la main" par les étudiants eux-mêmes est envisageable. Pour les étudiants la nécessité d'effectuer les calculs relatifs au dimensionnement du transformateur apparaît alors complètement et ces calculs ne leur sembleront plus stériles (comme il arrive parfois) mais tout à fait concrets.

Ce convertisseur est très simple et son utilisation est restreinte aux cas économiques où la charge est constante. Cependant en ajoutant un transistor en parallèle avec la grille et l'émetteur du transistor on obtient une possibilité de réglage tout ou rien de la tension de sortie et on pourrait envisager l'étude d'une régulation de la tension de sortie.

Annexe : Inductance de fuite due au câblage

Dans les convertisseurs en électronique de puissance les inductances "indésirables" constituent une source de surtension inévitable. Il faut tenir compte des inductances de câblage dans la conception des montages.

Un fil parcouru rectiligne par un courant I crée à la distance r un champ magnétique $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$ et de ce fait une énergie

magnétique existe dans son environnement avec la densité volumique $\frac{dW}{dV} = \frac{B^2}{2\mu_0}$. Le fil possède donc l'inductance l

$$\text{telle que } \frac{1}{2} l I^2 = \iiint_{\text{tout l'espace}} \frac{B^2}{2\mu_0} dV.$$

On cherche à estimer l'inductance linéique d'un fil. Envisager un fil unique rectiligne et infini n'a pas de sens car tout circuit électrique doit être fermé, il existe forcément un conducteur "retour". Si on effectue le calcul de l'énergie pour un fil unique on constate que l'intégrale diverge ce qui montre l'impossibilité d'un fil unique. Pour estimer l'inductance linéique d'un fil on peut envisager plusieurs dispositions.

- Premièrement on considère que les conducteurs constituent une spire circulaire unique de grand diamètre R . Le champ au centre d'une spire de rayon R parcourue par le courant I est $B = \frac{\mu_0 I}{2R}$ (cf. loi de Biot et Savart). Le flux dans la spire qui

correspond à l'inductance l est au moins égal à $\mathbf{j} = B \cdot \mathbf{R} = l \cdot I$ (il est en fait supérieur à cette valeur car le champ près des conducteurs est supérieur au champ au centre de la spire).

L'inductance linéique s'exprime alors $\mathbf{I} = \frac{l}{2 \cdot \mathbf{p} \cdot R} > \frac{\mu_0}{2 \cdot R} \cdot \mathbf{p} \cdot R^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot \mathbf{p} \cdot R} = \frac{\mu_0}{4} H/m$

Numériquement $\mathbf{I} > \frac{\mu_0}{4} = \mathbf{p} \cdot 10^{-7} H/m$ soit $\boxed{\mathbf{I} > 3 nH/cm}$

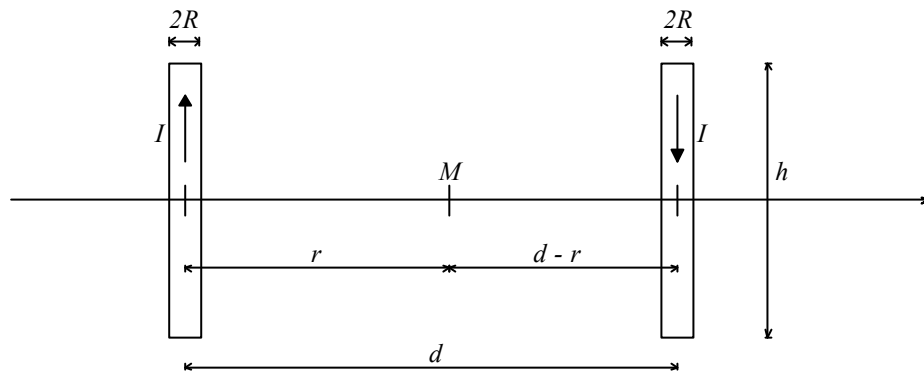
Ce calcul très simple permet d'estimer la valeur minimale des inductances de câblage. (il donne aussi une unité facile à interpréter pour \mathbf{m}).

- Une seconde situation envisageable correspond à l'inductance de deux fils parallèles de rayon R et placés à la distance d .

Au point M situé à la distance r ($R < r < d - R$) d'un fil le champ magnétique est $B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \mathbf{p}} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{d-r} \right)$ Le flux

existant entre les deux fils sur une longueur h s'exprime (en négligeant le champ à l'intérieur des fils)

$$\mathbf{j} = \int_R^{d-R} \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \mathbf{p}} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{d-r} \right) \cdot h \cdot dr \quad \text{soit} \quad \mathbf{j} = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot h}{2 \cdot \mathbf{p}} \left[\text{Ln} \left(\frac{r}{d-r} \right) \right]_R^{d-R} = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot h}{\mathbf{p}} \text{Ln} \left(\frac{d-R}{R} \right) \quad \text{si } d \gg R; \quad \mathbf{j} \approx \frac{\mu_0 \cdot I \cdot h}{\mathbf{p}} \text{Ln} \left(\frac{d}{R} \right)$$



Disposition des fils

Ce flux correspond à l'inductance l telle que $\mathbf{j} = l \cdot I$. Soit $l \approx \frac{\mu_0 \cdot I \cdot h}{\mathbf{p}} \text{Ln} \left(\frac{d}{R} \right)$ L'inductance linéique est donc

$$\boxed{\mathbf{I} = \frac{l}{2 \cdot h} \approx \frac{\mu_0}{2 \cdot \mathbf{p}} \text{Ln} \left(\frac{d}{R} \right) H/m}$$

On constate ce qui est évident que l'inductance linéique diminue en rapprochant les fils

(en les torsadant). En pratique $\boxed{\mathbf{I} \approx 10 nH/cm}$ est obtenu pour $\frac{d}{R} \approx 100$ et constitue une valeur usuelle qui permet d'estimer les inductances parasites dues au câblage "volant".

L'évolution de l'électronique de puissance en traction ferroviaire

Christian LECLERC

Ingénieur d'études honoraire à la Direction du matériel et de la traction de la SNCF

suite de la 3ème partie : L'ère des thyristors, leurs applications en traction à moteurs sans collecteur

Les excellents résultats obtenus par la locomotive BB 10004, prototype à moteurs synchrones autopilotés décrite à l'article précédent (*La Revue 3EI n° 35*), et les avantages présentés par cette nouvelle chaîne de traction à moteur sans collecteur, ont abouti à la commande par la SNCF, en 1984, de la série des locomotives bicourant BB 26000 de 5600 kW pouvant rouler à 200 km/h et dont les premiers exemplaires devaient sortir en 1988.

Si la BB 10004 a permis d'envisager la réalisation d'une locomotive bicourant de forte puissance à moteurs synchrones, elle n'en avait pas permis l'expérimentation réelle puisque issue d'une machine uniquement monophasée. Il était donc souhaitable de le faire avant d'entreprendre les BB 26000.

1985 : les locomotives BB 20011 et 20012

La fabrication de l'importante série des BB 22200 se terminant en 1986, la SNCF a pu utiliser 2 de ces locomotives bicourant, dès leur sortie d'usine, pour en faire pratiquement les machines de présérie des BB 26000. C'est ainsi que les BB 22379 et 22380 ont reçu des moteurs synchrones JEUMONT-NORD STS 105-37-8 de 2800 kW, à enroulements statoriques triphasés à 2 étoiles, décalées entre elles de 30° électriques et à rotor à 8 pôles saillants alimentés par bagues et balais ; ils sont à ventilation forcée.

Quant aux blocs principaux, ils sont issus des blocs d'origine adaptés par les ateliers d'Hellemmes de la SNCF, qui ont aussi assuré le montage de l'ensemble des 2 locomotives (l'opération finale, la plus spectaculaire, est représentée sur la *figure 170*). Elles sont sorties sous les numéros 20011 et 20012 ; la *figure 171* les représente réunies.

Ces 2 machines, pratiquement sœurs jumelles, se sont réparties les essais d'équipements destinés aux futures BB 26000 : La BB 20011 a eu pour vocation la mise au point des équipements électriques, tandis que la 20012 a été utilisée pour tester divers composants de freinage (frein de stationnement à ressort, système antienrayeur à contrôle de glissement en électrique et en pneumatique) ainsi que le mode de freinage par conjugaison automatique qui, quel que soit le mode de conduite utilisé (commande manuelle ou à vitesse dite "imposée") et même en cas de freinage d'urgence, associe le freinage électrique, utilisé prioritairement et le freinage pneumatique qui ne sert qu'en complément ou en cas de défaillance électrique.



Figure 170 *La BB 20011 en cours de montage aux ateliers SNCF d'Hellemmes. La caisse, complètement équipée, va être descendue sur ses bogies restés au sol ; la masse totale de la locomotive, en ordre de marche est de 90,5 t.*

(cliché TRANSPHOT - Jean Paul Demoy)



Figure 171 *Les locomotives "jumelles" BB 20011 et 20012 de 5600 kW, à moteurs synchrones autopilotés. Ces engins bicourant, aptes au 200 km/h, ont préfiguré les BB 26000.*

(cliché TRANSPHOT - Jean Paul Demoy)

En ce qui concerne le fonctionnement de la partie électrique, il est évidemment à rapprocher de celui de la BB 10004 en ce qui concerne l'alimentation des moteurs synchrones autopilotés.

Comme le montre le schéma de la figure 172, elle n'en diffère que par le dispositif de commutation

assistée qui, le fonctionnement sous 1500 V = le demandant, n'utilise plus de selfs couplées mais un simple condensateur qui demande cependant un petit hacheur auxiliaire de pré-charge.

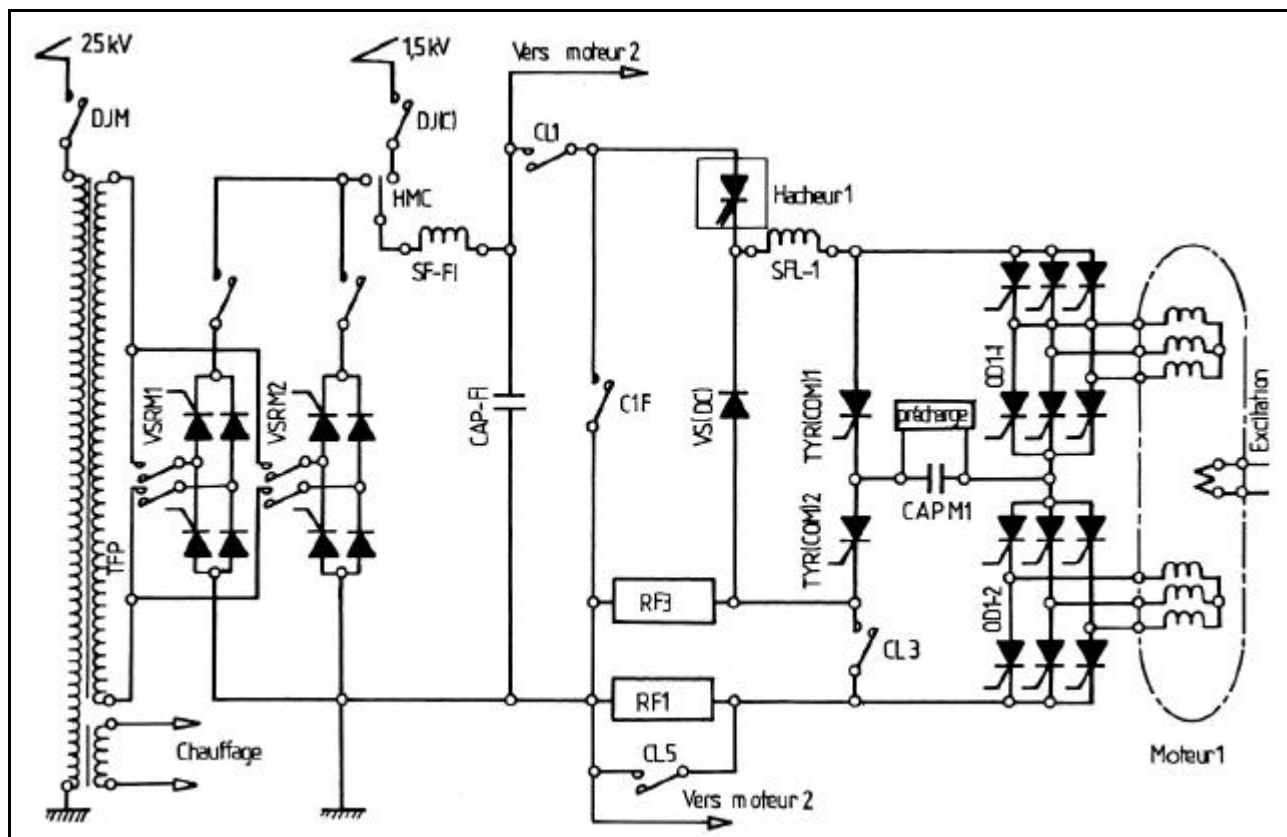


Figure 172 Schéma des locomotives BB 20011 et 20012. Chacun des 2 moteurs synchrones de 2800 kW a un bobinage statorique constitué de 2 étoiles triphasées imbriquées ; les 2 onduleurs qui alimentent les étoiles sont connectés en série sur la source de courant (contrôlée par le Hacheur 1, qui fonctionne à 300 Hz) et leurs commandes sont décalées de 30° électriques. Les selfs de lissage SFL-1 (et SFL-2) de 2 mH chacune sont calibrées pour 1800 A eff tandis que le filtre d'entrée, commun aux 2 hacheurs principaux, est constitué d'une self SF-FI de 2,5 mH (3400 A eff) et d'un condensateur CAP-FI de 12 mF (en 9 bacs de 1,333 mF).

(schéma extrait d'une plaquette SNCF - Direction du Matériel et de la Traction)

S'agissant de locomotives bicourant, la source principale de courant est, bien sûr, contrôlée par un hacheur issu de celui des BB 22200. En 25 kV, ce hacheur est alimenté, sous tension régulée, par 2 redresseurs en ponts mixtes, VS.RM1 et VS.RM2, connectés en parallèle (alors que les BB 22200 n'ont qu'un seul redresseur) ; tandis qu'en 1500 V = il reçoit directement son alimentation du pantographe avec interposition du disjoncteur continu rapide DJ(C) du type HRKS.

- En traction : Le fonctionnement est assez semblable à celui de la BB 10004, comme déjà évoqué plus haut ; la commutation assistée par le condensateur CAP M et les thyristors THYR(COM) est utilisée jusqu'à 14 km/h. L'effort de traction (courants statoriques) et la vitesse sont réglés par le hacheur principal puis par désexcitation du moteur lorsque la tension maximale est atteinte (hacheur totalement débloqué). Le contacteur de freinage C1F doit, bien sûr, être ouvert, tandis que CL1, CL3 et CL5 sont fermés.

- En freinage : Le moteur devient alors alternateur avec possibilité de réglage de son excitation et les onduleurs fonctionnent en redresseurs à diodes (les thyristors sont constamment amorcés) et débitent dans les résistances de freinage RF. Pour ce faire, les contacteurs de ligne CL1, CL3 et CL 5 doivent impérativement être ouverts.

On parvient à régler l'effort de retenue et à le maintenir lorsque la vitesse décroît en agissant sur l'excitation du moteur et en "modulant" la résistance de freinage RF3 par le hacheur principal qui vient alors la court-circuiter fugitivement lorsqu'il est amorcé (C1F doit alors être fermé).

En cas de disparition de la tension caténaire, l'alimentation du hacheur auxiliaire d'excitation est assurée par la tension prise aux bornes de l'une des résistances de freinage RF, si le freinage est déjà établi ; sinon, la batterie 72 V y pourvoit un court instant, permettant l'amorçage du système.

- **Innovation technologique** : Les semi-conducteurs des hacheurs principaux et des onduleurs des BB 20011 et 20012 sont refroidis, de façon classique, par circulation d'air au travers des ailettes de leurs refroidisseurs et sont montés dans des tiroirs embrochables comparables à celui représenté à la *figure 110* (voir le n°31 de *La Revue 3EI* - page 69) ; cette technologie se rencontre, en effet, sur la plupart des matériels de la génération des BB 7200 et 22200 ainsi que sur les motrices des rames TGV PSE.

Cependant, pour les 2 redresseurs en ponts mixtes, la société JEUMONT-SCHNEIDER a utilisé un mode différent pour le refroidissement des semi-conducteurs : **le refroidissement en cuves étanches**

Il a été étudié et développé par la société ALSTHOM-ATLANTIQUE, dans son usine de Massy-Palaiseau, dès les années 1970 et expérimenté à la SNCF sur des redresseurs en toiture de 2 automotrices de la série Z 6100, puis Z 6150, en 1975 et 1979.

En 1980, la société JEUMONT-SCHNEIDER développe à son tour cette technique et équipe la BB 7220 de 3 hacheurs l'utilisant (alimentation de l'un des 2 moteurs). Les puissantes BB 26000 à venir vont être la première utilisation de grande ampleur de cette nouvelle technologie de refroidissement qui sera, par la suite, utilisée sur l'ensemble du parc des TGV à moteurs synchrones de la SNCF, mais aussi sur des automotrices des rames du RER d'Ile de France de la SNCF et de la RATP, ainsi que sur certains "matériels métro" (métro de Lyon en particulier) et des trolleybus à hacheurs, réalisés par la société TCO pour la ville de Saint-Etienne ; d'où l'expérimentation préalable sur les 2 locomotives synchrones de présérie.

Il s'agit d'un procédé très performant thermiquement, qui présente les avantages de réduire et simplifier les connexions entre les cellules et surtout de les mettre à l'abri de la pollution par l'air de refroidissement ce qui, pour des composants sensibles soumis à des tensions élevées, réduit considérablement les risques d'amorçages.

Bien que l'apparition de cette nouvelle technique de refroidissement puisse être considérée comme un événement dans l'évolution des semi-conducteurs de puissance et de leurs applications en traction, la description de son fonctionnement thermique ne peut être développée ici de façon très détaillée ; elle demande toutefois à être explicitée dans son principe :

Comme représenté à la *figure 173*, une cuve cylindrique (de l'ordre de 30-40 cm de diamètre et 60 cm de longueur), est partiellement (un espace libre est nécessaire à la présence d'une phase gazeuse) remplie d'un liquide frigorigène, on dit aussi fluide caloporteur, bouillant à une température relativement basse. On a utilisé pendant de nombreuses années du "fréon R113" (appellation, devenue une marque de fabrique, du trifluorotrchloroéthane), bouillant à 47 ° C à la pression atmosphérique, puis, la législation l'imposant (respect de la convention de Montréal), un produit de substitution, le "FC 72", il est cependant un peu moins performant.

Dans ce liquide, est immergé l'ensemble des cellules semi-conductrices, accompagnées de leurs composants annexes (circuits RRC de protection, transformateurs d'impulsions, voyants "néon" de contrôle, etc...), qui sont montés sur une structure en forme de colonne fixée sur l'un des flasques circulaires de fermeture de la cuve au travers duquel passent les connexions électriques.

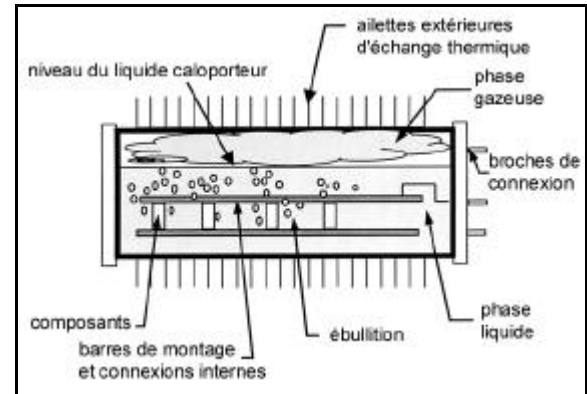


Figure 173 *Principe de fonctionnement d'une cuve étanche à liquide caloporteur, communément appelée "cuve Fréon"*
(document Alain Jeunesse - SNCF, C.I.M. Le MANS)

Un phénomène d'ébullition localisée prend naissance au niveau des parties chaudes des cellules, absorbant ainsi très énergiquement les calories au plus près de leur siège de production (la pastille de silicium). La vapeur produite emplit l'espace libre supérieur et vient se condenser au contact de la paroi interne de la cuve qui doit donc être refroidie extérieurement ; c'est dans cet état d'ébullition localisée que l'on obtient le meilleur transfert thermique.

Si la puissance à évacuer augmente, le phénomène d'ébullition se poursuit mais on assiste à une élévation de la température du liquide ainsi que de la pression interne à la cuve. Des dispositifs de contrôle des intensités dans les semi-conducteurs et de la ventilation extérieure des cuves sont prévus pour ne pas atteindre les limites fixées, tant pour la température des jonctions que pour la pression interne de la cuve ; la température de "travail" du liquide est d'environ 80 ° C et la pression interne inférieure à 3,6 bars. La puissance que peut évacuer une cuve "standard" est de l'ordre de 5 à 6 kW.

La technique de refroidissement des semi-conducteurs par immersion dans un fluide frigorigène permet, de par son efficacité thermique, d'utiliser des cellules de plus grands diamètres, à pastilles de 50, 63, 75 mm, sans conduire à des tailles de refroidisseurs classiques prohibitives, d'où une réduction du nombre des cellules et une simplification des câblages.

Le diagramme de la *figure 174*, ci-après, met bien en évidence l'efficacité de ce mode de refroidissement puisqu'il s'agit de la comparaison avec le procédé classique utilisé jusqu'alors. On voit que pour une température de jonction de 150 ° C (on est alors proche de la limite communément admise) le refroidissement "Fréon" permet de doubler la puissance dissipée dans la jonction.

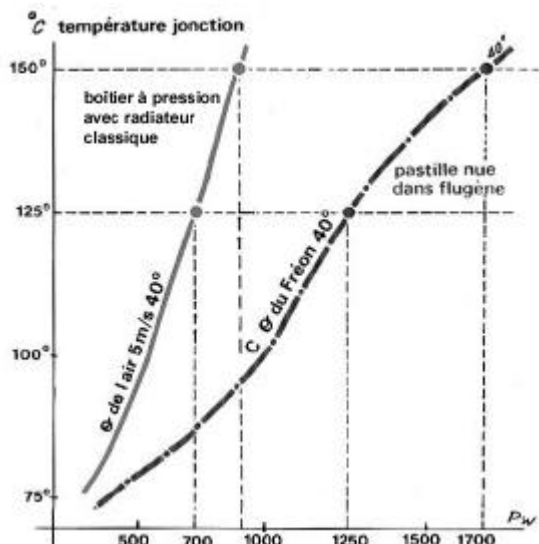


Figure 174 : Mise en évidence des possibilités de refroidissement offertes par l'immersion d'une cellule dans un liquide frigorigène maintenu à une température moyenne de 40 ° C.

(extrait d'une notice ALSTHOM-ATLANTIQUE - 1979)

Afin de réduire au maximum la résistance thermique entre le silicium et le liquide caloporteur, la

société ALSTHOM utilise, comme indiqué sur le diagramme, des cellules sans boîtier, à pastille nue.

La société JEUMONT-SHNEIDER a adopté, quant à elle et comme il sera vu plus loin, des boîtiers spéciaux rainurés qui ont été préférés pour des raisons de facilité de montage, de protection au stockage et à la manipulation des cellules (vues en tant que "pièces détachées"). Des essais comparatifs ont montré que leur efficacité thermique est très proche de celle des cellules sans boîtier.

Par ailleurs, si la constante de temps thermique d'un refroidisseur de semi-conducteur classique, à ventilation directe, est de l'ordre de la minute, elle atteint 15 à 30 minutes pour le refroidissement par liquide frigorigène. Cela est particulièrement appréciable pour les matériels assurant des services à démarrages fréquents, tels les rames automotrices de banlieue ou les matériels urbains (métro, trolleybus) où l'on définira les systèmes de refroidissement des semi-conducteurs, non plus pour le régime de démarrage mais pour un régime moyen, nettement plus favorable.

Comme déjà évoqué, l'installation en vase clos des composants supprime leur pollution, et par conséquent la nécessité de leur difficile et fréquent nettoyage.

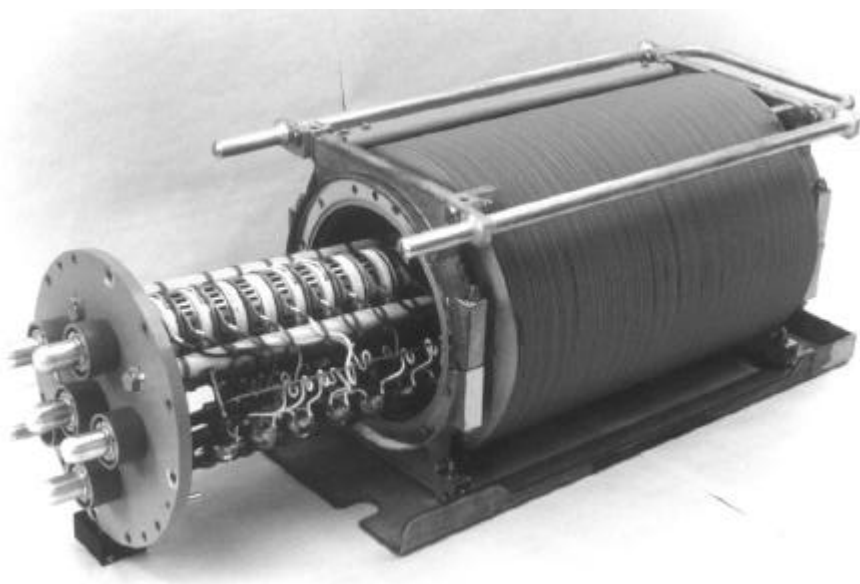


Figure 175 Vues représentatives de la technologie de refroidissement par immersion des semi-conducteurs dans un liquide caloporteur bouillant vers 47 ° C. Les cellules sont montées en compression selon une structure en forme de colonne qui est supportée par le flasque arrière de fermeture de la cuve, au travers duquel passent les connexions de puissance terminées par les broches mâles de connexion au bloc ; les circuits annexes sont aussi installés au plus près.

La vue de gauche montre bien les broches de connexion tandis que la vue de droite (en haut) met en évidence les connecteurs "bas niveau" qui traversent le flasque avant (non monté) lequel est muni d'un hublot d'observation du niveau du liquide et des voyants "néon" de contrôle des cellules.

On remarquera les rainures taillées dans les plots des boîtiers des cellules, elles sont destinées à permettre la circulation, puis la vaporisation du liquide, au plus près des parties chaudes (la pastille de silicium) ; il s'agit donc de boîtiers spéciaux prévus pour ce type de refroidissement. Par ailleurs, on augmente la surface d'échange thermique avec l'extérieur en rainurant la paroi interne ; ce qui n'apparaît pas sur la figure de gauche où seules les ailettes extérieures de la cuve, très serrées, sont visibles.

(à droite, photographies d'origine ALSTHOM, et à gauche, d'origine SNCF - Département de la Construction de la Direction du Matériel)

La grande densité de composants, mise en évidence sur les vues de la *figure 175*, conduit à des connexions internes très courtes ; la proximité d'éléments soumis à des différences de tension élevées est facilitée par les grandes qualités isolantes du liquide (14 kV/mm pour le "fréon"). Les divers conducteurs étant, eux aussi, immergés et donc facilement refroidis, on pourra pratiquer une beaucoup plus grande densité de courant que dans l'air, d'où de plus faibles sections de cuivre.

1988 : les locomotives BB 26000

La fabrication de cette importante série de 234 locomotives bicourant de 5600 kW s'est répartie sur une dizaine d'années, de 1988 à 1998 (la BB 26001 est représentée à la *figure 176*).



Figure 176 Vue de la BB 26001, premier exemplaire des 234 locomotives bicourant à moteurs synchrones autopilotés de 5600 kW. Ces puissantes machines de 90 tonnes peuvent rouler à 200 km/h avec un effort résiduel de 10000 daN. (cliché ALSTHOM)

Elles ont les mêmes moteurs de traction STS 105-37-8 et le même schéma électrique que les BB 20011 et 20012, décrites plus haut, mais la technologie du refroidissement dite "au fréon" a, comme prévu, été étendue à l'ensemble des semi-conducteurs de puissance qui sont répartis dans 18 cuves étanches.

Caractéristiques de traction et de freinage :

Les caractéristiques en traction et en freinage rhéostatique, telle que représentées aux diagrammes effort/vitesse des *figures 177*, montre les grandes possibilités des BB 26000 pour la remorque de longs trains de voyageurs jusqu'à 200 km/h (16 voitures "corail") et de lourds trains de fret (2050 t) en rampe de 8,8 ‰ ; on peut donc parler du caractère "universel" de ces machines.

Equipement électrique :

Si le schéma est pratiquement celui adopté pour les BB 20011 et 20012 (*figure 172*), il en diffère toutefois par de légères différences dans la valeur des selfs de lissage qui sont passées à 3,2 mH chacune (1800 Aeff), au lieu de 2 mH ; la self et les condensateurs du filtre d'entrée ont conservé les mêmes valeurs (2,5 mH et 12 mF, mais en 7 bacs de 1,7 mF chacun). L'ensemble des selfs d'entrée et de lissage, ainsi que les 2 selfs de 3 mH (330 A) de sortie des

hacheurs auxiliaires et les 2 selfs de 46 i H d'inversion des hacheurs principaux, sont installées dans 2 cuves refroidies à l'huile minérale, en association avec celle du transformateur principal.

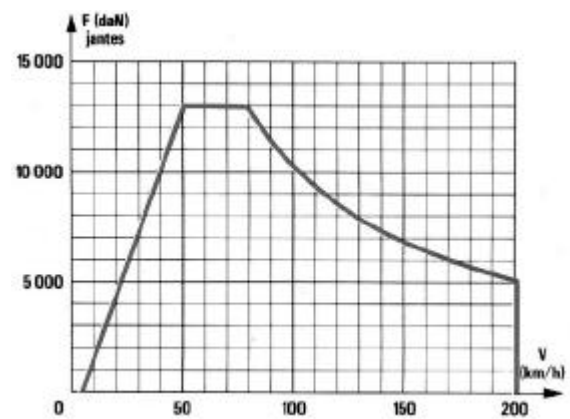
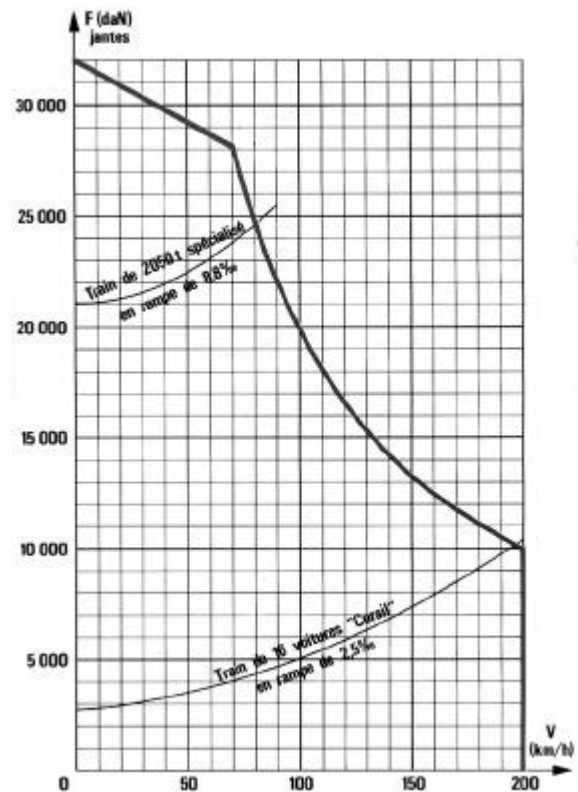


Figure 177 caractéristiques effort / vitesse en traction des locomotives BB 26000.

(diagrammes extraits d'une plaquette SNCF - Direction du Matériel et de la Traction)

En ce qui concerne le passage de la commutation assistée à la commutation naturelle des onduleurs de courant, il a lieu à 18 km/h au lieu de 14 km/h sur les machines prototypes.

Semi-conducteurs de puissance :

Ils sont pratiquement tous contenus dans les 18 cuves étanches de refroidissement installées horizontalement dans le grand bloc central représenté à la *figure 178*.

On y retrouve les 4 cuves des redresseurs en ponts mixtes VS.RM1 et VS.RM2, déjà présentes sur les BB 20011 et 20012, auxquelles s'ajoutent 14 cuves qui contiennent les diodes (VS...) et thyristors (TYR...) des 2 hacheurs principaux et 4 onduleurs de courant.

A ces cuves, sont adjoints des organes, de technologie plus classique, tels les 10 sous-ensembles embrochables des divers convertisseurs auxiliaires et selfs annexes de valeurs et dimensions modestes (limitation en di/dt des thyristors des hacheurs) .

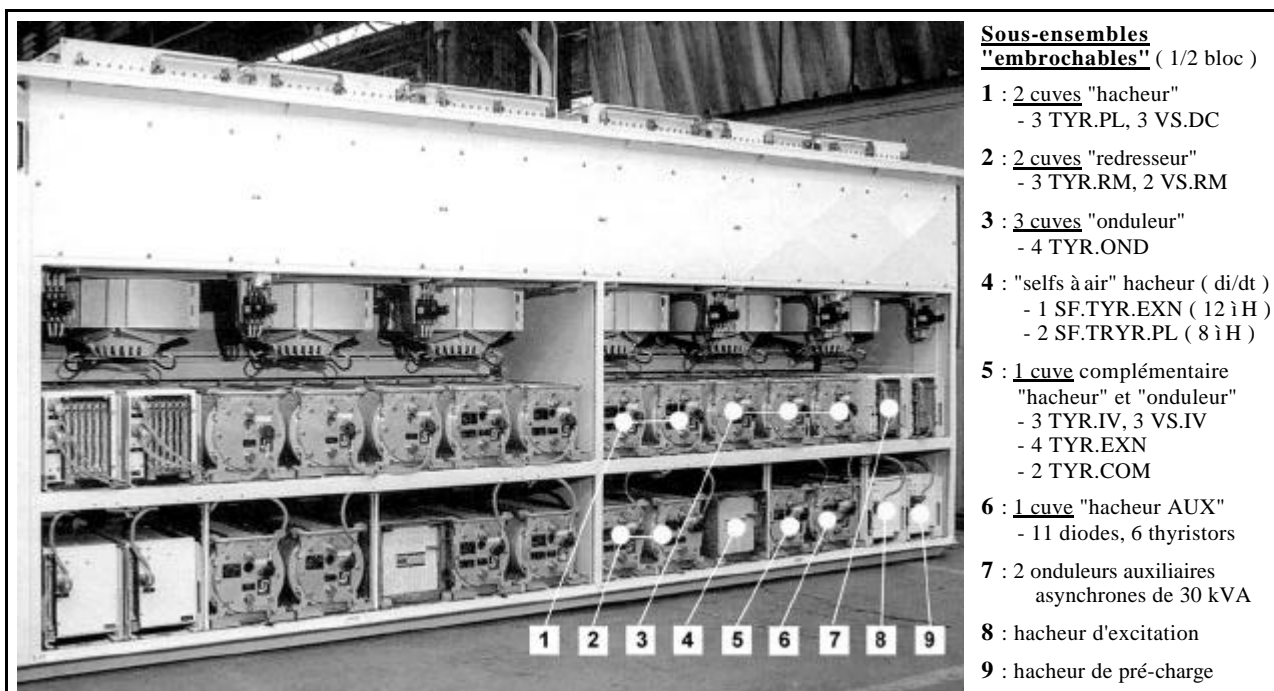


Figure 178 Vue du grand bloc central des locomotives BB 26000. Les sous-ensembles définis ci-dessus correspondent aux équipements d'un demi-bloc, ils permettent l'alimentation de l'un des 2 moteurs de traction. La 2ème moitié de gauche du bloc est de composition identique et de disposition symétrique. On remarquera l'imposante batterie des 18 cuves ainsi que les 6 moto-ventilateurs de refroidissement ; le haut des résistances de freinage apparaît en partie supérieure.

L'un des 2 onduleurs auxiliaires (onduleurs asynchrones de tension de 30 kVA à transistors), repérés 7, alimente le moteur du compresseur et celui de la pompe à huile du transformateur, qui sont communs ; en cas d'avarie, ces organes seront alimentés par l'onduleur correspondant de l'autre demi-bloc.

Le hacheur auxiliaire (repère 6) alimente sous 525 V les 2 onduleurs auxiliaires, le hacheur d'excitation et le hacheur élévateur de pré-charge (525 / 2220 V), ainsi que les chargeurs de batterie qui sont installés à l'extérieur du bloc central ; l'ensemble de ces onduleurs et hacheurs auxiliaires utilisent des transistors de puissance (modules hybrides de 300 A, 1000 V).

(cliché ALSTHOM extrait d'une plaquette du Département de la construction de la Direction du Matériel - SNCF - 1988)

Seuls 6 thyristors, affectés à des limiteurs de tension et 2 diodes annexes sont montées sur des refroidisseurs à air classiques.

Comme déjà évoqué, l'aspect particulier des boîtiers à ailettes des cellules utilisés dans les diverses cuves, développées par la société JEUMONT-SCHNEIDER, est bien représenté à la *figure 179*.

Les abréviations utilisées pour désigner les fonctions des divers semi-conducteurs dans le tableau récapitulatif et à la *figure 178*, sont voulues assez explicites. On précisera simplement que :

- les diodes VS.DC sont les diodes dites de décharge, elles sont communément appelées diodes de "roue libre"
- les diodes VS.FI.CVS.AUX protègent en tension inverse les condensateurs électrochimiques des filtres de sortie des hacheurs auxiliaires
- les diodes VS.FM (cuve 6), sont les diodes d'aiguillage de l'alimentation du CVS.AUX (qui apparaissent en haut du schéma de la *figure 179*).

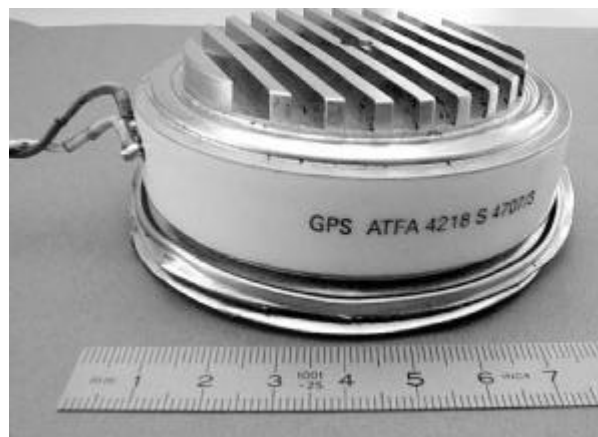


Figure 179 Photographie de l'un des thyristors en boîtier rainuré de 63 mm de diamètre (pastille de 50 mm) utilisé dans les cuves des BB 26000. Ce type de boîtier spécial, exclusivement utilisé par JEUMONT-SCHNEIDER, améliore l'échange thermique entre la cellule et le liquide caloporteur.

(photographie d'origine SNCF)

Le tableau suivant récapitule les semi-conducteurs de puissance utilisés sur les BB 26000 :

	Fonctions	Tension (V)	diam. boîtier (mm)	Mode refr.	Thyr. rapide	Nb.
Ponts mixtes	TYR.RM VS.RM	2200 3600	82 "	cuves 2		12 8
Hacheurs principaux	TYR.PL TYR.EXN TYR.IV VS.IV VS.DC	1800 2400 2300 " 3400	82 63 " " 82	cuves 1 et 5	x x	12 8 6 6 12
Onduleurs	TYR.OND TYR.COM	2000 3500	82 63	cuves 3	x	24 4
Hacheurs auxiliaires	TYR.PL TYR.IV VS.PL VS.EXN VS.DC VS.FM	1400 " " " " "	50 " " " " "	cuves 6	x x	6 6 6 6 6 4
Limiteurs	TYR.LMT TYR.LMT.EXN TYR.LMT.CVS.AUX	2000 2400 1200	50 " 36	Air " "	x x	2 2 2
Annexes	VS.FI.CVS.AUX	1200	36	Air		2

Equipements auxiliaires :

Le schéma synoptique de la *figure 180*, ci-dessous, en donne une vue d'ensemble. L'indépendance des équipements propres à un bogie a été privilégiée puisque, seuls le moto- compresseur (MAS.CPR) et

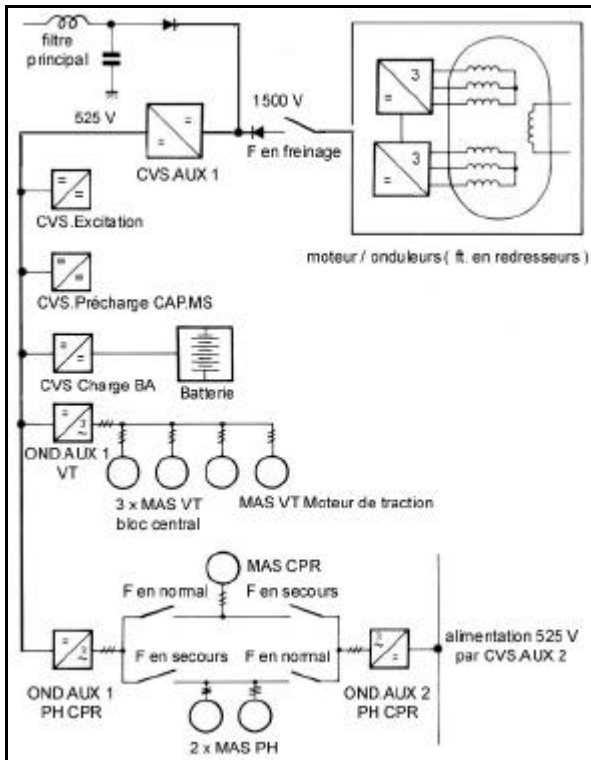


Figure 180 Schéma synoptique de l'alimentation des équipements auxiliaires des BB 26000 correspondant à une 1/2 machine. L'onduleur OND AUX 1, qui alimente les 3 moto-ventilateurs du 1/2 bloc central et celui de l'un des 2 moteurs de traction, délivre une fréquence proportionnelle aux courants du moteur de traction.

les 2 moto-pompes à huile (MAS.PH), des aéroréfrigérants de l'ensemble transformateur-selfs, ont leur alimentation partagée par les 2 hacheurs auxiliaires (CVS.AUX), avec possibilité de "secours" en cas d'avarie de l'un de ces 2 hacheurs.

Tous les moteurs auxiliaires sont du type asynchrone à cage (d'où l'appellation MAS... sur le schéma). Cela est nouveau sur une locomotive bicourant, où, du fait de l'alimentation en 1500 V =, on devait utiliser des moteurs à collecteur traditionnels, sauf pour la pompe à huile du transformateur, qui, n'étant pas utilisé en 1500 V, autorisait le plus souvent l'emploi d'un moteur monophasé à phase capacitive.

C'est le développement par la société JEUMONT-SCHNEIDER, de petits onduleurs de tension de 30 kVA, repérés OND.AUX... , utilisant des transistors de puissance (ce sont des modules "darlington", à technologie hybride, de 300A - 1000 V, montés sur semelle de refroidissement, en cuivre nickelé, isolée galvaniquement), qui a permis cette innovation ; leur schéma de principe, très simple, est représenté à la *figure 181*.

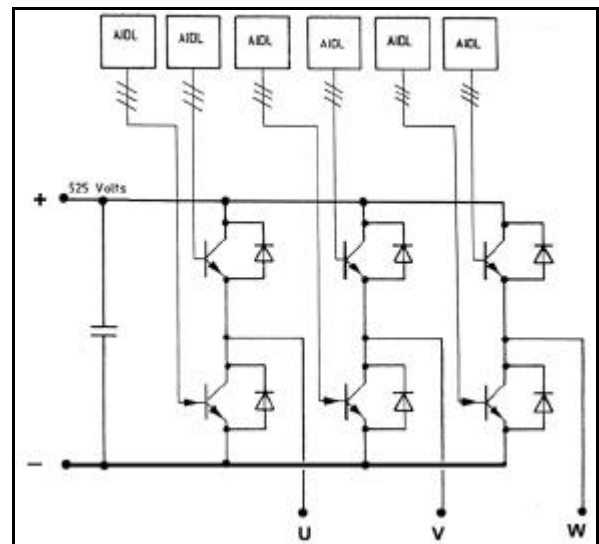


Figure 181 Schéma de principe des onduleurs auxiliaires de 30 kVA à transistors qui équipent les BB 26000.

Les diodes montées en antiparallèles aux bornes des transistors sont intégrées dans le boîtier des modules ; les éléments repérés "AIDL", sont les cartes électroniques de commande des transistors qui comportent des circuits d'aide à la commutation des transistors.

Mis à part un capteur de courant, à effet Hall, placé à l'entrée 525 V de l'onduleur, tous les éléments sont représentés ; ces onduleurs à transistors sont d'une extrême simplicité en ce qui concerne la partie puissance.

Les 6 modules à transistors sont fixés sur un refroidisseur commun, ventilé de façon classique.

Ces onduleurs fournissent des tensions triphasées de 380 V eff (composante fondamentale), à 60 Hz, pour lesquelles les moteurs "MAS..." sont définis.

Ils sont pilotés sur le mode "MLI" qui permet l'obtention de tensions et fréquences plus basses (U/F constant = 6,33) nécessaires au fonctionnement à vitesse variable des moteurs asynchrones ; ce principe

de commande des onduleurs sera vu par la suite, plus en détail, lorsque seront abordés les engins équipés de moteurs de traction asynchrones alimentés par des onduleurs de tension.

L'obtention de tensions de 380 V d'amplitude nécessite l'alimentation continue des onduleurs sous 525 V, ceci est facilement obtenu au moyen des hacheurs auxiliaires CVS.AUX qui alimentent également les petits hacheurs annexes : d'excitation, de charge de la batterie et de pré-charge des condensateurs de commutation des onduleurs de traction ; ces hacheurs de petite puissance utilisent les mêmes modules à transistors que les onduleurs OND.AUX... .

En configuration de freinage rhéostatique, l'alimentation des hacheurs auxiliaires est assurée par la tension obtenue en sortie des onduleurs de traction (qui

fonctionnent alors en redresseurs) si la tension caténaire lui est inférieure (diodes d'aiguillage VS.FM).

On obtient ainsi le fonctionnement de l'ensemble des auxiliaires même en cas de disparition de la tension caténaire ; dans ce cas, l'"amorçage" du dispositif est alors assuré par l'alimentation de l'excitation du moteur de traction directement par la batterie).

Enfin, en complément de la description des équipements électriques des BB 26000, dont les 18 cuves de refroidissement des semi-conducteurs du bloc central sont les pièces maîtresses (voir *figure 178*), la partie "appareillage" de ce bloc n'en est pas moins imposante. Elle apparaît sur la photographie de la *figure 182*, ainsi que la représentation du principe de fonctionnement de la ventilation centrale de la locomotive (à droite).

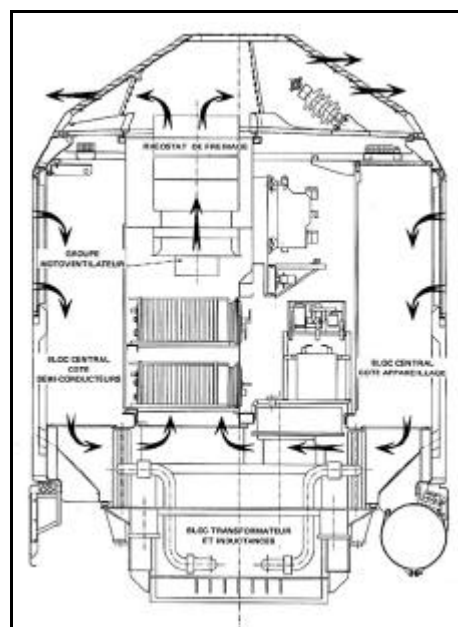
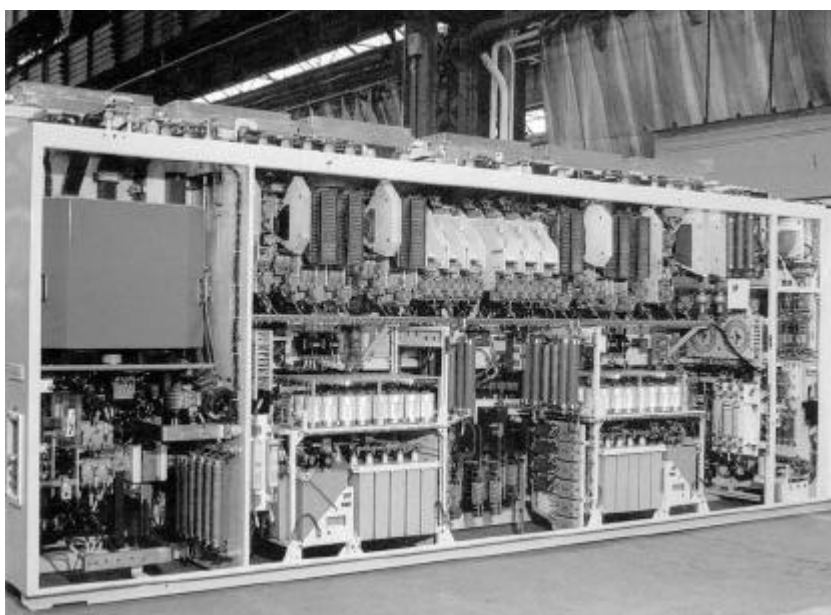


Figure 182 *Vue du compartiment "appareillage" du bloc central des BB 26000 (à gauche) et schéma du dispositif de ventilation centrale (à droite). On y retrouve des organes classiques, tel le disjoncteur rapide, à courant continu, du type "HRKS" (derrière son capot à gauche), ainsi que les condensateurs d'extinction des hacheurs principaux et de commutation assistée des onduleurs (au centre en partie basse) ; au-dessus d'eux, sont situées les platines sur lesquelles sont montés les condensateurs électrochimiques des filtres d'entrée des CVS.AUX.*

Le schéma de la ventilation montre que l'air extérieur, aspiré par les 6 moto-ventilateurs au travers des persiennes latérales de la caisse, commence par transiter au travers des aérateur-refrigerants latéraux du transformateur principal (dont la cuve contient aussi les selfs du filtre d'entrée des hacheurs et de lissage) pour remonter ensuite au travers des ailettes des cuves et ressortir, en toiture, par les résistances de freinage.

(cliché ALSTHOM extrait d'une plaquette du Département de la construction de la Direction du Matériel - SNCF - 1988)

Les BB 26000 sont les dernières locomotives de forte puissance de la SNCF qui utilisent les thyristors de manière dominante. Car les moteurs de traction des locomotives qui vont leur faire suite seront des machines asynchrones alimentées par des onduleurs de tension, à commutation forcée et à fréquence de découpage élevée, pour lesquels les thyristors ne conviendront plus.

Mais les TGV de seconde génération vont sortir pratiquement en même temps que les BB 26000 et ils seront aussi à moteurs synchrones autopilotés. Leur description fera l'objet du prochain article ainsi que

celle de matériels automoteurs de moyenne puissance, équipés cette fois de moteurs asynchrones ; ces moteurs seront alimentés par des onduleurs de courant qui, bien qu'à commutation forcée dans toute leur plage de fonctionnement, pourront encore utiliser des thyristors en toute pertinence.

Bibliographie :

- Documents SNCF - Département Construction de la Direction du Matériel
- Documentation ALSTHOM-ATLANTIQUE
- Cours de Traction électrique, Alain Jeunesse - Direction du Matériel de la SNCF - C.I.M. Le Mans

Histoire de l'électricité : l'électron

Jean-Claude BOUDENOT

Responsable des départements composants et technologies
Semi-conducteurs et plate-forme technologique,
THALES R & T,
Domaine de Corbeville, 91404 ORSAY Cedex

1. De « l'elektron » de Thalès à « l'électron » de Stoney

On fait habituellement remonter l'histoire de l'électricité à Thalès, qui - avec ses contemporains - remarque que l'ambre jaune frotté à sec acquiert la propriété d'attirer les corps légers. L'ambre jaune se disant en grec êlektron (i. e la pierre qui attire), le phénomène associé sera baptisé au XVII^{ème} siècle, par William Gilbert, du même nom.



THALES
(625-548 Av. J. C.)

En 1770 les notions suivantes sont établies : Existence de deux types de charges, positive et négative ; notion de conservation de la charge électrique ; mise en évidence de deux types de force, l'une attractive, l'autre répulsive, ainsi que de deux types de matériaux : les isolants et les conducteurs. En 1785, muni de la balance de torsion de son invention, Charles Coulomb formule sa fameuse loi : «La force répulsive de deux petits globes électrisés de la même nature d'électricité est en raison inverse du carré de la distance du centre des deux globes.» A la fin de 1799, Volta, en inventant la pile ouvre une nouvelle ère, celle de l'électrocinétique. La pile permet en effet d'obtenir un courant électrique continu. Arago traduit bien en 1831 l'admiration qu'elle suscite : « Cette pile, faite de tant de couples dissemblables séparés par un peu de liquide, est, quant à la singularité des effets, le plus merveilleux instrument que les hommes n'aient jamais inventé... » Début 1820, Oersted découvre l'action d'un courant sur l'aiguille aimantée d'une boussole. Dès qu'il a connaissance de cet effet, Ampère, dans un effort prodigieux dont il rend compte presque chaque semaine pendant plusieurs mois à l'Académie, créé à la fin 1820 l'électrodynamique. Faraday découvre en 1831 l'induction. Après cette découverte il existe en physique trois types d'électricité. Le premier est issu des machines électrostatiques, le second des piles et enfin le troisième est celui associé aux phénomènes d'induction. En 1832, Faraday s'attache à montrer l'identité de l'électricité provenant de ces différentes sources. Pour cela, il examine méthodiquement leurs

effets sur le galvanomètre et sur les décompositions chimiques produites. Cela l'amène, en 1833 et 1834, à faire une étude systématique de l'électrolyse et de ses lois. Il construit les appareils nécessaires et introduit de nouveaux termes tels que : *électrode, anode, cathode, ion*¹, *voltamètre*... Il découvre les lois de l'électrolyse auxquelles son nom restera attaché. Faraday montre que la quantité de produits dégagés est proportionnelle à la quantité d'électricité qui a traversé le circuit et parle de «quantités chimiquement équivalentes». Il frôle la notion d'électron et de mole d'électron : «Si nous empruntons la terminologie de la théorie atomique, des corps qui sont équivalents entre eux ont associé à eux des quantités égales d'électricité. Mais je dois avouer que je répugne à employer le mot atome, car s'il est aisé d'en parler, il est par contre très difficile de s'en faire une idée claire»².



G. J. STONEY
(1826-1911)

George Johnstone Stoney (1826-1911) franchit le pas en août 1874. Il introduit la notion de quantité élémentaire d'électricité dans un article intitulé : *Sur les unités physiques de la Nature*³ qu'il lit à une réunion de la British Association à Belfast. Stoney y indique que la quantité minimum d'électricité est l'une des trois unités fondamentales de la Nature, les deux autres étant la vitesse de la lumière (dont Maxwell a montré qu'elle s'écrit comme le rapport de l'unité électrostatique à l'unité électrodynamique de la charge) et la constante de gravitation de Newton.

¹ Le mot *ion* a été forgé par Faraday pour indiquer, en s'inspirant du participe présent du verbe grec qui signifie «aller», l'association entre masse et charge électrique

² On donnera plus tard à la quantité d'électricité associée à une mole d'électron le nom de Faraday ; 1 faraday =

$Ne = 96\,500$ coulomb où N indique le nombre d'Avogadro

³ G. J. Stoney, *On the Physical Units of Nature*, Philosophical Magazine, vol. 11, p. 381 (1881)

Stoney conclut : « Et finalement, la Nature nous présente dans le phénomène d'électrolyse, une quantité élémentaire d'électricité qui est indépendante du corps particulier sur laquelle elle agit. Pour clarifier ce point je vais expliciter la « loi de Faraday » selon les termes suivants : *Pour chaque liaison chimique qui est rompue dans un électrolyte, une certaine quantité d'électricité traverse cet électrolyte qui est la même dans tous les cas.* Cette quantité d'électricité je l'appellerai E_r . Si nous en faisons notre unité d'électricité, nous ferons probablement un pas très important dans nos études des phénomènes moléculaires ». Stoney lit de nouveau son article le 16 février 1881 cette fois devant la société Royale de Dublin. Peu de temps après, à l'occasion d'une conférence Faraday qu'il fait à la *Royal Institution* le 5 avril 1881, Helmholtz indique : « Maintenant le résultat le plus saisissant de la loi de Faraday est peut-être ceci. Si nous acceptons l'hypothèse suivant laquelle les substances élémentaires sont composées d'atomes, nous ne pouvons éviter de conclure que l'électricité, aussi bien positive que négative, est également divisée en quantités élémentaires qui se comportent comme des atomes d'électricité. Tant qu'il se déplace dans un électrolyte liquide, chaque ion reste entier avec sa charge électrique équivalente ou [plus simplement] avec son équivalent. La décomposition peut avoir lieu à la surface des électrodes s'il existe une force électromotrice suffisante, et alors dans ce cas l'ion donne sa charge électrique et devient électriquement neutre ». En 1891 Stoney introduit le terme électron⁴, et la même année Richarz donne une estimation de sa charge ; $12,9 \cdot 10^{-11}$ ues cgs soit $4,3 \cdot 10^{-20}$ C. En 1894, Stoney en donne une valeur plus précise, il écrit⁵ : « Dans cet article nous avons fait une estimation de la valeur de cette remarquable unité fondamentale de l'électricité, pour laquelle j'avais suggéré le nom d'*électron*. Selon cette estimation la valeur de l'électron est de 10^{-20} [Coulomb]. »

2. Première mise en évidence de l'électron : l'effet Zeeman

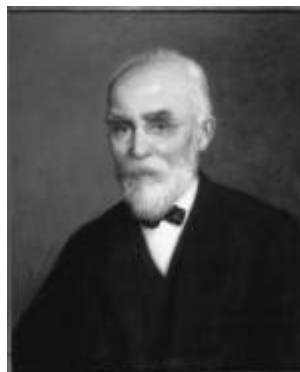
L'effet Zeeman, nommé du nom de son découvreur et interprété par Hendrick Antoon Lorentz⁶, peut être considéré comme la première mise en évidence de l'existence de l'électron dans la mesure où pour la première fois une particule de masse très inférieure à la masse du plus léger des atomes est soupçonnée. L'origine de la découverte de l'effet Zeeman remonte clairement aux derniers travaux de Faraday. La recherche, par Faraday, d'un effet du champ

⁴ Stoney, *The scientific Transactions of the Royal Dublin Society*, vol. iv. P. 583 (1891) ; Le terme introduit par Stoney vient du mot grec *electron* (ambre), déjà employé pour former le mot électricité.

⁵ Stoney, *Of the «electron» or Atom of Electricity*, *Philosophical Magazine*, series 5, vol. 38, p. 418-420, Oct. 1894

⁶ Voir par exemple : *H. A. Lorentz : La naissance de la physique moderne*, J. C. Boudenot, J. J. Samuëli, Editions Ellipses (à paraître, 2004)

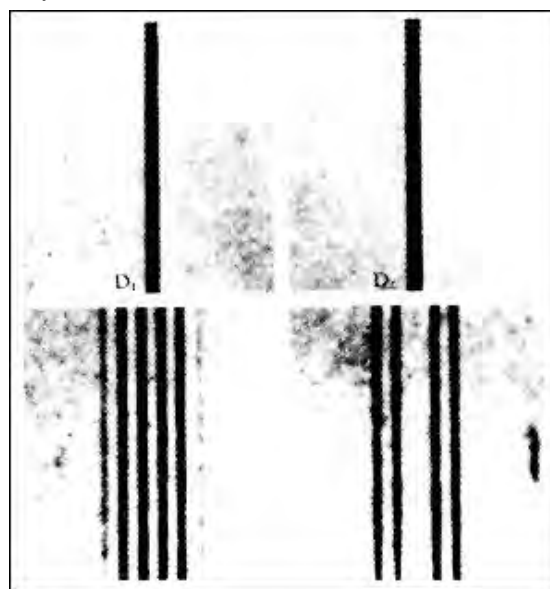
magnétique sur le spectre de la lumière, est en effet une des toutes dernières effectuées par le savant anglais.



H. A. LORENTZ
(1853 – 1928)

On peut lire à la dernière entrée de son cahier⁷, à la date du 12 mars 1862 : « Une flamme sans couleur produite par le gaz montait entre les pôles d'un électroaimant et des sels de sodium, de lithium, etc. ont été utilisés pour donner la couleur. Un polariseur de Nichol a été placé juste devant l'intense champ magnétique tandis qu'un analyseur a été placé de l'autre côté du dispositif.

Ensuite l'électroaimant a été allumé et éteint, mais pas la moindre trace d'un effet sur les lignes spectrales ou d'un changement de ces lignes n'a été observée, dans aucune des positions du polariseur ou de l'analyseur. »⁸



Raies spectrales en l'absence et en présence de champ magnétique

En août 1896, à l'Institut de physique de Leyde, Zeeman insère la flamme d'un bec bunsen brûlant du sodium dans l'entrefer d'un puissant électroaimant. Il analyse le spectre d'émission à l'aide d'un réseau de

⁷ Faraday a consigné scrupuleusement ses 46 années de recherche dans un journal qu'il ouvre en 1816 à 25 ans et qu'il ferme le 23 mars 1862 à 71 ans. Ce journal comprend 16 041 recherches numérotées.

⁸ Dans son discours Nobel, Zeeman fait référence aux travaux de Faraday : « C'était le 12 mars 1862, dans le laboratoire de la Royal Institution, que Faraday réalisa l'expérience. Les notes consignés dans son cahier de laboratoire, bien que pas complètement claire, ne laissent aucun doute sur le fait qu'il essaya de démontrer, à l'aide d'un spectroscopie que le champ magnétique a une influence directe sur une source lumineuse ».

diffraction de Rowland et constate un élargissement de la raie (raie qui est très fine en l'absence de champ magnétique). L'élargissement mesuré par Zeeman est de l'ordre de $0,2 \text{ \AA}$, valeur très faible, mais néanmoins mesurable grâce à l'excellente résolution du réseau de Rowland⁹. Zeeman pense d'abord à un artefact de mesure. En effet, le grand Maxwell avait déclaré, le 15 septembre 1870, lors d'une réunion de la *British Association* de Liverpool: « qu'aucune force de la nature ne pouvait altérer, même de la façon la plus faible, la masse ou la période d'oscillation des particules émettrices de lumière. » Zeeman qui abandonne tout d'abord cet axe de recherche s'y intéresse de nouveau en octobre 1896 et remplace le sodium par du lithium (comme Faraday): il constate de nouveau le phénomène. Pour compléter sa première série d'expérimentations, lors desquelles il observait le spectre dans une direction perpendiculaire au champ magnétique (observation transversale), Zeeman perce l'électroaimant pour voir si un effet longitudinal (i.e. parallèle au champ magnétique) existe. Il découvre que cet effet existe bien. Il analyse un éventuel effet inverse (élargissement des raies d'absorption en présence d'un champ magnétique) et le met en évidence. Zeeman multiplie les expériences et les constatations et présente ses résultats (par l'intermédiaire de Kamerlingh Onnes) à l'Académie des sciences d'Amsterdam le 31 octobre 1896, sous la forme d'un premier article intitulé: *On the influence of a magnetisation on the nature of light emitted by a substance*¹⁰. Il commence son article ainsi: « Il y a quelques années des mesures relatives au phénomène de Kerr m'ont conduit à l'idée qu'un champ magnétique pourrait changer la lumière émise par une flamme, et m'ont sollicité à faire l'expérience... J'ai observé le spectre d'une flamme de sodium placée entre les pôles d'un électro-aimant... Le résultat fut négatif. Je ne serais pas revenu de sitôt sur cette expérience si je n'étais tombé sur le passage suivant d'une notice de Maxwell sur Faraday... », puis Zeeman poursuit: « Les différentes expériences rendent de plus en plus probable que les raies d'absorption d'une vapeur incandescente – et en conséquence les raies d'émission aussi – sont élargies par l'action magnétique. » Il ajoute: « Alors, si c'est vraiment le cas l'action magnétique superposée aux vibrations libres des atomes, qui sont à l'origine des raies spectrales, doit faire apparaître d'autres vibrations de périodes différentes. »

⁹ Rowland a perfectionné le réseau en 1882 ; il a réussi à faire des réseaux de diffraction contenant jusqu'à 100.000 traits dont la résolution théorique est de $0,06 \text{ \AA}$ [$R = 1/DI = kN$ avec ici $k = 1$ (1^{er} ordre) ; $N = 100.000$; $I \gg 6000 \text{ \AA}$ (raie jaune du sodium)]. Une telle résolution était inaccessible vingt ans plus tôt lors des expériences entreprises par Faraday. Zeeman utilise un réseau concave de Rowland à 600 traits au millimètre.

¹⁰ Communications from the Physical Laboratory at the University of Leiden 33 (1896). *On the influence of a magnetisation on the nature of light emitted by a substance*, Part I, 8.

Zeeman affine ses recherches et présente un second article à l'Académie des sciences d'Amsterdam le 28 novembre 1896, pour lequel il garde le même titre que le premier: *On the influence of a magnetisation on the nature of light emitted by a substance*¹¹. Il commence ainsi: « La théorie électromagnétique de M. Lorentz me semblait particulièrement propre à donner une explication correcte du changement magnétique de la durée des vibrations... M. Lorentz, à qui j'ai exposé mes idées, a eu immédiatement la bienveillance de m'indiquer comment, dans sa théorie, on arrive aux équations du mouvement d'un ion [électron] dans un champ magnétique, et m'a fait remarquer que les bords de la raie spectrale devaient être polarisés circulairement. La grandeur de l'élargissement déterminerait même le rapport de la charge à la masse de la particule exécutant les vibrations lumineuses considérées.... Cette conséquence particulièrement importante de la théorie de M. Lorentz, à savoir l'état de polarisation de la raie spectrale élargie par l'aimantation, je l'ai vérifiée par l'expérience. »

En effet, au moment de la découverte de Zeeman, au troisième trimestre 1896, Lorentz avait publié sa théorie des électrons¹² (1895) et pouvait ainsi la mettre à l'épreuve dans le cadre de l'interprétation du phénomène mise en évidence par Zeeman. Dans sa théorie, Lorentz fait l'hypothèse que l'émission de lumière par des atomes de substances incandescentes est due à la vibration des électrons dont la fréquence détermine la longueur d'onde. En se limitant à l'étude d'une seule raie, il peut de plus faire l'hypothèse que chaque atome ne contient qu'un électron oscillant. Lorsque l'électron est déplacé de sa position d'équilibre, une force proportionnelle au déplacement le ramène à sa position initiale, comme dans le cas d'un pendule. Mais on sait depuis Fresnel que toute vibration harmonique peut être considérée comme résultant de trois composantes: une vibration rectiligne, suivant une direction quelconque et deux vibrations circulaires inverses situées dans un plan perpendiculaire à cette direction. En l'absence de champ magnétique la période de ces oscillations coïncident. En présence de champ magnétique la vibration rectiligne n'est pas modifiée tandis que, sous l'influence de la force magnétique, l'une des vibrations circulaires perpendiculaire au champ est accélérée, tandis que l'autre est retardée. Dans le cas d'une observation transversale, on obtient donc trois fréquences distinctes, c'est le *triplet normal* de Zeeman, dont chaque composante est polarisée selon le caractère de la vibration électronique qui l'engendre. Dans le cas d'une observation longitudinale, la raie initiale disparaît et les deux raies latérales apparaissent, polarisées circulairement, l'une à gauche, l'autre à droite (le sens des polarisations dépend du signe de la charge). Ainsi, quatre semaines seulement après les

¹¹ Communications from the Physical Laboratory at the University of Leiden 33 (1896). *On the influence of a magnetisation on the nature of light emitted by a substance*, Part II, 242.

¹² Qu'il baptisait à cette époque encore « ions »

premières expérimentations de Zeeman, la théorie de Lorentz¹³, non seulement explique ces résultats, mais permet de prévoir la polarisation de la lumière des raies. Lorentz trouve un décalage en fréquence donné

$$\text{par (en notation actuelle): } \Delta\nu = \frac{eB}{4\pi m}.$$

Dès novembre 1896 Lorentz estime que l'interprétation de l'effet découvert par Zeeman est « une preuve directe de l'existence des ions [électrons]¹⁴. »

Zeeman est en mesure de donner, dès novembre 1896, un ordre de grandeur du rapport e/m qu'il trouve égal à 10^7 e.m.u. Lorsqu'il indique cette valeur à Lorentz, ce dernier s'exclame : « Cela semble vraiment mauvais ; cela ne correspond pas du tout à ce qui est attendu »¹⁵. En effet le rapport e/m escompté était de l'ordre de 10^4 e.m.u (la valeur $e/m = 10^4$ e.m.u était observé dans des électrolytes comportant des ions hydrogène).

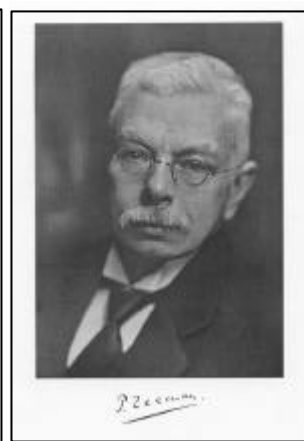
Zeeman présente en mai 1897 un troisième article à l'Académie des sciences d'Amsterdam intitulé : *On doublets and triplets in the spectrum caused by external magnetic forces*¹⁶. Zeeman y expose les résultats obtenus lors de ses nouvelles recherches : des mesures plus fines faite cette fois sur du cadmium lui ont permis de conclure qu'en présence du champ magnétique, on constate, pour une observation transversale, en plus de la raie initiale, deux raies latérales et que dans le cas d'une observation longitudinale, la raie initiale disparaît et deux raies latérales apparaissent. Ainsi comme cela était prévu par la théorie de Lorentz, il ne s'agit pas d'un élargissement des raies spectrales, mais d'un dédoublement (ou d'un détriplement) de ces raies. De plus, corrigeant une erreur laissée dans ses articles de 1896 il conclut, d'après la direction de la polarisation des raies dédoublées, que les « ions » [électrons] doivent être chargés négativement. Il confirme l'ordre de grandeur du rapport e/m et précise sa valeur ; les « ions » sont visiblement d'une autre nature que ceux apparaissant dans les expériences d'électrolyse.

Lorsque Lorentz élabore sa théorie des électrons, puis son interprétation de l'effet Zeeman, il n'a aucune donnée sur la charge et la masse de l'électron. Tout au plus connaît-on les rapports e/m déterminées dans des expériences d'électrolyse, et l'on sait que ce rapport est le plus grand dans le cas de l'atome d'hydrogène. Or les décalages mesurés par Zeeman impliquent un rapport e/m environ 1000 fois plus grand ! En admettant, ce qui paraissait dès cette époque être une hypothèse raisonnable, que la charge des électrons de Lorentz soit la même (en valeur absolue) que celle des

atomes d'hydrogène dans les électrolytes, leur masse doit être 1000 fois plus petite que celle de ces derniers.



Publication de Zeeman



Peter ZEEMAN
(1865 – 1943)

Enfin les résultats issus des expérimentations de Zeeman sont un premier signe de l'existence d'une particule chargée négativement au moins 1000 fois moins massive que l'atome d'hydrogène, ils sont : « La preuve expérimentale directe de l'existence de particules chargées pondérables (électrons) dans la flamme. »¹⁷

3. L'électron de J. J. Thomson

Revenons au début de l'année 1897, pour noter que les électrons de Lorentz, dont l'existence vient d'être confirmée par Zeeman, sont liés à l'atome. J. J. Thomson n'allait pas tarder à découvrir les électrons sous forme libre. L'histoire commence de nouveau avec Faraday. Dès 1835, Faraday étudie les décharges électriques dans l'air raréfié et observe « l'espace obscur de Faraday ». En 1858, l'allemand Julius Plücker (1801-1868), qui étudie la conductibilité et le spectre d'émission des gaz, montre que ces décharges sont déviées par le champ magnétique créé par un aimant. En approchant l'aimant près du tube, il observe une déviation de la tache phosphorescente produite par la décharge sur le verre. Son élève Johann Hittorf (1824-1914) réussit en 1869 à montrer que le rayonnement se dirige en ligne droite. En effet, en interposant sur son trajet une croix métallique, il peut observer l'ombre de la croix se dessiner en sombre sur la paroi illuminée. C'est en 1876 que Eugen Goldstein (1859-1930) donne à ce rayonnement le nom resté célèbre de « rayons cathodiques ». En 1879, William Crookes (1832-1919) améliore le vide par l'utilisation de pompes à mercure et fait une étude systématique des « rayons cathodiques » dans les « tubes de Crookes ». Puis en 1883 Heinrich Hertz (1857-1894) essaie de dévier les rayons cathodiques par un champ électrique produit par des plaques métalliques insérées dans le tube, mais le résultat est négatif. En 1892, il

¹³ Voir par exemple : Lorentz, Ann. Der Phys. 63, 279, 1897 ; Phys. Zeitschr. 1, 39, 1899

¹⁴ Cette phrase a été retrouvée dans le cahier de laboratoire de Zeeman à la date du 23 novembre 1896

¹⁵ Zeeman, *Faraday's researches on magneto-optics and their development*, Nature 128 (1931) 365-368

¹⁶ P. Zeeman, *On doublets and triplets in the spectrum caused by external magnetic forces*, Philosophical Magazine, 5th series, 44 (1897)

¹⁷ Zeeman à Lodge, 24 janvier 1897, cité par Th. Arabatzis.

place une feuille de métal très mince dans le tube et constate que les rayons cathodiques la traverse sans la percer. Son élève Philipp Lenard (1862-1947) réussit même en 1894 à faire passer les rayons cathodiques à l'extérieur du tube à travers une feuille métallique de 2,5 μm d'épaisseur. La non-déviations des rayons cathodiques par un champ électrique, et leur caractère pénétrant leur fait conclure à une origine ondulatoire¹⁸. Le français Jean Perrin résume ainsi la situation : « Les uns, avec Goldstein, Hertz ou Lenard, pensent que ce phénomène est dû, comme la lumière, à des vibrations de l'éther ou même, que c'est une lumière à courte longueur d'onde. On conçoit bien alors que ces rayons ont une trajectoire rectiligne, excitent les phosphorescences et impressionnent les plaques photographiques. D'autres, avec Crookes ou J. J. Thomson, pensent que ces rayons sont formés par de la matière chargée négativement avec une grande vitesse. Et l'on conçoit alors très bien leurs propriétés mécaniques, ainsi que la façon dont ils s'incurvent dans un champ magnétique. Cette dernière hypothèse m'a suggéré quelques expériences... »¹⁹ Jean Perrin réalise en effet une expérience où un faisceau de rayons cathodiques est recueilli par un cylindre de Faraday, ce qui lui permet de mettre en évidence la charge apportée par le faisceau. Le résultat de cette expérience est publié en décembre 1895 dans les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences²⁰, il y indique que « les rayons cathodiques sont chargés négativement. » En 1895, dans une première série d'essais, J. J. Thomson refait l'expérience de Perrin²¹. Peu après, en réfléchissant à l'expérience de Hertz, il suspecte le fait que le gaz résiduel dans le tube s'ionise sous l'action des rayons cathodiques, créant ainsi un écran électrostatique empêchant les rayons cathodiques d'être déviés par le champ. Dans une seconde série d'essais, pour lesquels il réalise un puissant pompage du tube, il obtient un bien meilleur vide que Hertz et en refaisant son expérience, il constate la déviation des rayons ! Il indique alors qu'« il ne voit pas de moyen d'éviter de conclure que les rayons cathodiques sont chargés d'électricité négative portée par des particules de matière » et poursuit en se demandant « quelles sont ces particules ? des atomes, des molécules ou de la matière très finement divisée ? » Dans une troisième série d'expériences il mesure avec précision la déviation des rayons cathodiques sous l'action d'un

champ magnétique, ce qui lui permet d'en déduire le rapport de la charge e sur la masse m des rayons cathodiques (rapport e/m). Il parvient finalement en 1897 à une triple conclusion²². Les rayons cathodiques sont des corpuscules chargés négativement, le rapport de leur charge e à leur masse m (e/m) est 1000 fois plus grand que le rapport analogue calculé pour l'ion hydrogène à partir des lois de l'électrolyse, et enfin ce rapport e/m ne dépend ni de la cathode, ni de l'anticathode ni du gaz²³. Thomson conclut finalement que : « Les rayons cathodiques sont de la matière dans un nouvel état, un état dans lequel la subdivision de la matière est beaucoup plus grande que dans un gaz ordinaire : un état dans lequel toute matière ... est une et de même nature ; cette matière étant la substance à partir de laquelle tous les éléments chimiques sont formés. » Il ajoute toutefois : « La petitesse de la valeur m/e [il utilise dans son article le rapport m/e et non e/m] est, je pense, due à la grande valeur de e ainsi qu'à la faible valeur de m . Il me semble que les charges portées par les corpuscules dans l'atome sont grandes comparées à celles portées par les ions dans un électrolyte ». Il conçoit clairement un constituant universel de la nature (et même d'après lui le constituant universel de la nature), mais sans toutefois l'identifier à l'électron. Ainsi, Paul Langevin écrit dans sa thèse en 1902 : « Nous conserverons pour ces particules cathodiques le nom de corpuscule proposé par le professeur J. J. Thomson. Celui d'électron, également usité, est souvent employé dans un sens un peu différent. » (J. J. Thomson n'utilisera le mot électron pour désigner son corpuscule que vers 1911-1912) Enfin, J. J. Thomson précise : « Si les rayons cathodiques étaient des corpuscules chargés se déplaçant à haute vitesse, il s'ensuivrait que la taille de ces corpuscules devrait être petite comparée à celle des atomes ou molécules ordinaires. »

En 1899 J. J. Thomson mesure indépendamment la charge e et le rapport e/m de son corpuscule. Il introduit ainsi son article²⁴ : « Dans ces expériences [celles de 1897], seul le rapport m/e a été déterminé, et non pas les valeurs de m et e séparément. Il est par conséquent possible que la petitesse du rapport soit du

¹⁸ Lenard conclut en fait que pour que le rayonnement soit d'origine particulaire, il faudrait que sa masse soit beaucoup plus faible que celle d'un atome, hypothèse qu'il ne peut pas accepter.

¹⁹ Jean Perrin, *Nouvelles expériences sur les rayons cathodiques*, Compte Rendu de l'Académie des Sciences, 30 déc. 1895.

²⁰ Ibid

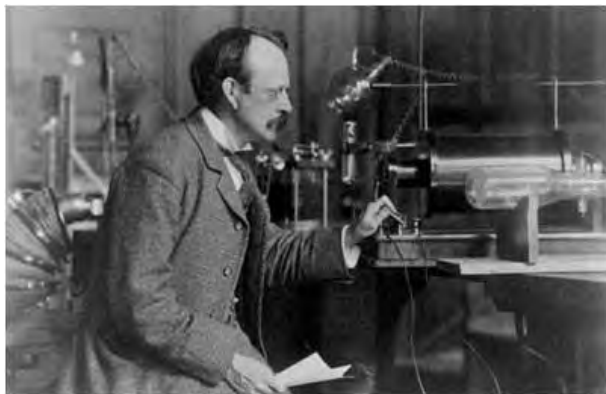
²¹ Dès 1893, J. J. Thomson déclare : « qu'il n'y a aucune autre branche de la physique [que celle de l'étude des rayons cathodiques] qui offre plus de promesses et d'opportunités pour pénétrer les secrets de la Nature ». En 1894, J. J. Thomson annonce qu'il a trouvé que la vitesse des rayons cathodiques ($1.9 \cdot 10^7$ m/s) est de loin inférieure à celle de la lumière ($3 \cdot 10^8$ m/s)

²² J. J. Thomson, *Cathode Rays*, Philosophical Magazine, 44, 293 (1897). Cet article date d'octobre 1897, mais Thomson avait présenté l'hypothèse subatomique plus tôt dans l'année, le 30 avril 1897 au cours d'une conférence du soir à la *Royal Institution*. Le texte de cette conférence a été publié dans la revue *The Electrician* trois semaines plus tard sous forme d'un article intitulé *Cathode Rays* (J. J. Thomson, *Cathode Rays*, *The Electrician* 39, 21 mai 1897)

²³ Quatre mois avant la découverte de J. J. Thomson, E. Wiechert (également célèbre pour le « potentiel de Lienard et Wiechert ») fait une mesure du rapport e/m des rayons cathodiques, qu'il publie le 7 janvier 1897, mais son travail passe inaperçu et J. J. Thomson n'en a pas connaissance (Emil Wiechert, *Ergebniss einer Messung der Geschwindigkeit der Kathodenstrahlen*, *Schriften der physikalisch-ökonomisch Gesellschaft zu Königsberg* 38 (1897), 3)

²⁴ J. J. Thomson, *On the masses of the ions in gases at low pressure*, *Philosophical Magazine*, 48, 295 (dec. 1899).

au fait que la charge e soit plus grande que celle portée par un ion dans un électrolyte, plutôt que parce que la masse m est très faible. » Il rappelle qu'il a pu montrer en 1898 que la charge e produit par effet photoélectrique (sur des gaz par des rayons X) est bien « du même ordre de grandeur que la charge portée par un atome d'hydrogène dans une expérience d'électrolyse » et qu'en conséquence : « la masse du porteur est seulement de l'ordre du millième de celle d'un atome d'hydrogène. »²⁵



Expérience de J. J. THOMSON

Finalement J. J. Thomson, grâce à une méthode suggérée par son assistant C. T. R. Wilson (production de gouttelettes dans une vapeur sursaturée avec des «électrons» comme germes), parvient à déterminer e , et, connaissant e/m , à en déduire la masse m du «corpuscule».

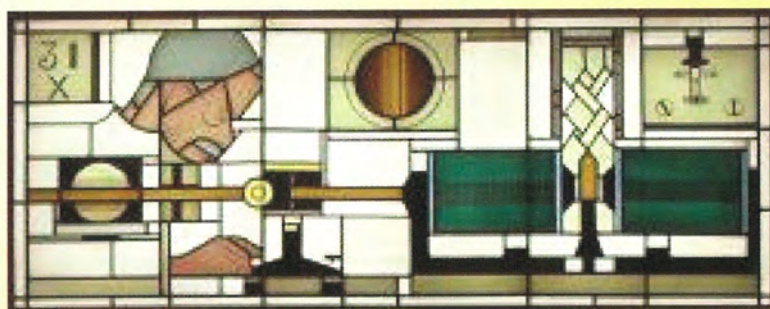
Thomson termine son article en introduisant ce qui deviendra *le modèle d'atome de Thomson* (modèle dit du *plum pudding*²⁶), il fait pour cela explicitement référence à la découverte de Zeeman : « La raison pour laquelle je crois qu'il y a beaucoup plus de corpuscules dans un atome qu'un ou deux, est lié à l'effet Zeeman. Le rapport m/e déterminé par cet effet est du même ordre de grandeur que celui que nous avons trouvé pour les corpuscules libres ; et les charges portées par ces particules mobiles, par lesquels l'effet Zeeman est interprété, sont toutes négatives. Maintenant s'il n'y avait qu'un ou deux de ces corpuscules dans un atome, nous devrions nous attendre à n'observer qu'une ou deux raies dans le spectre observé par Zeeman... nous concluons qu'il y a un nombre considérable de corpuscules dans un atome d'une substance donnant ce spectre. »

En 1900, Pierre et Marie Curie montrent que les rayons β des corps radioactifs sont également de même nature que les rayons cathodiques. Millikan (1868-1953) confirmera en 1909, par des mesures très précises, la charge de l'électron.

²⁵ J. J. Thomson, *On the charge of electricity carried by the ions produced by Röntgen rays*, Philosophical Magazine, 46, 528, December 1898

²⁶ J. J. Thomson, *On the structure of the atom*, Philosophical Magazine, 39, 237 (march 1904).

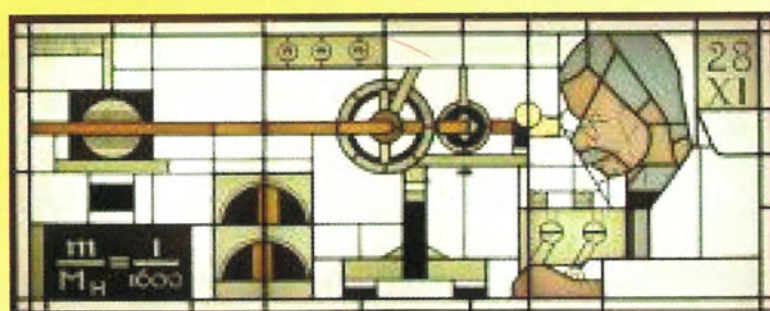
Les trois étapes de la découverte de l'effet Zeeman



1. Zeeman observe « l'élargissement » des raies spectrales



2. Lorentz relie l'écart de fréquence au rapport e/m



3. Zeeman confirme les prédiction de Lorentz et mesure e/m

3EI Enseigner l'Electrotechnique et l'Electronique Industrielle

c'est



- ☐ Une revue trimestrielle
- ☐ Un site web pour partager l'Enseignement du Génie Electrotechnique : <http://www.lesite3EI.com>

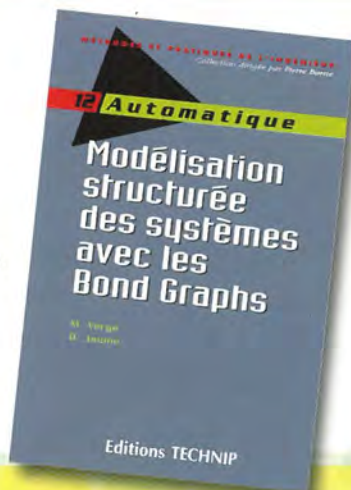
Thèmes futurs

- ☞ Juin 2004 - Les grands outils de production de l'énergie électrique
- ☞ Septembre 2004 - Pratiques pédagogiques et réalités industrielles
- ☞ Décembre 2004 - Production décentralisée de l'électricité : micro-centrales, éoliennes, co-générateurs ...

Automatique

Nouveauté

Un ouvrage pédagogique qui allie théorie et exemples industriels (avec conception détaillée de modèles et simulations effectuées)



Broché, 400 p. 59 €

Michel Vergé, professeur des universités, membre du Laboratoire de mécanique des systèmes et procédés de l'École nationale supérieure des arts et métiers (Paris).

Daniel Jaume, professeur des universités, membre du Laboratoire d'automatique du Conservatoire national des arts et métiers (Paris)

SCIENCES et technologies

Nouveauté

Cet ouvrage propose une approche simple et systématique de la programmation linéaire, dont le but est l'optimisation d'un critère linéaire par rapport aux paramètres du problème étudié en présence de contraintes linéaires

SCIENCES et technologies
16

K. Mellouli • A. El Kamel • P. Borne

Programmation linéaire et applications

ELEMENTS DE COURS ET EXERCICES RESOLUS

Editions TECHNIP

Broché, 128 p. 26 €

Présentée de manière simple et explicite, la méthode utilisée est illustrée par de nombreux exemples de mise en œuvre intéressants particulièrement les domaines liés à l'allocation et à l'optimisation des ressources concernant la finance, l'économie et la production.

t Editions TECHNIP

27, rue Ginoux, 75737 Paris Cedex 15 • Tél. 01 45 78 33 80
Fax 01 45 75 37 11 • E-mail : info@editionstechnip.com
www.editionstechnip.com