



*La revue*

# 3 E . I

*Publication trimestrielle du Cercle Thématique 13.01 de la SEE*

**ENSEIGNER L'ELECTROTECHNIQUE ET L'ELECTRONIQUE INDUSTRIELLE**



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



**NUMERO 20 MARS 2000**

*sixième année*

**Nouveauté**

**Systèmes électrotechniques  
Applications industrielles. Problèmes et solutions**

Douze problèmes relevant d'applications industrielles ou d'études avancées concernant le transport, la distribution et le conditionnement de l'énergie électrique. Un ouvrage clair et abondamment illustré.

J.-P. Caron, J.-P. Hautier. *Broché*, 288 p. €33,54 / 220 FF

**Nouveauté**

**Introduction à la théorie du signal et de l'information  
Cours et exercices**

Une présentation rigoureuse des techniques de traitement du signal, illustrée par des exercices corrigés abordant des situations concrètes souvent liées à des applications industrielles. F. Auger. *Broché*, 480 p. €44,21 / 290 FF

**De la diode au microprocesseur**

Un ouvrage essentiel à la compréhension et à la mise en œuvre des microprocesseurs. P. Demirdjian. (Avec disquette simulateur de code 68000).

*Broché*, 320 p. €42,69 / 280 FF

**Génie électrique. Du réseau au convertisseur**

Apprendre par l'exemple, une démarche rapide et efficace appliquée au génie électrique. J.-L. Cocquerelle. *Broché*, 304 p. €42,69 / 280 FF

**Réalisation, réduction et commande des systèmes linéaires**

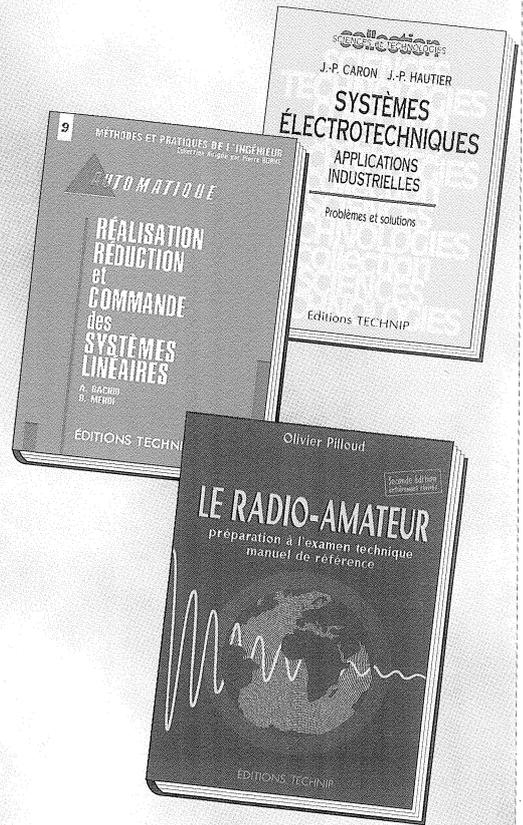
Le premier ouvrage synthétique dans ce domaine, illustré par de nombreux exercices. A. Rachid, D. Mehdi. *Relié*, 240 p. €44,21 / 290 FF

**Commande et optimisation des processus**

Détermination de la loi de commande, filtrage et reconstitution de données : une étude détaillée. P. Borne, et al. *Relié*, 312 p. €52,14 / 342 FF

**Le radio-amateur. Préparation à l'examen technique. Manuel de référence**

Cette nouvelle édition entièrement révisée d'un ouvrage à succès présente, entre autres, 600 exercices avec solutions. Elle met l'essentiel de la technique radio-amateur à la portée de tous. O. Pilloud. *Broché*, 544 p. €41,16 / 270 FF



La Revue 3 E.I. - Microsoft Internet Explorer - [Travail hors connexion]

Editer Edition Affichage Favoris Outils ?

Adresse http://www.lesite3EI.com

Vous souhaitez collaborer écrivez-nous à Florence.vadee@wanadoo.fr

# Le site 3 E.I.

ENSEIGNER L'ELECTROTECHNIQUE ET L'ELECTRONIQUE INDUSTRIELLE

**pour partager l'enseignement du Génie Electrotechnique**

Sur ce site (adresse <http://www.lesite3EI.com>) nous espérons pouvoir mettre en ligne en avril 2000 :

- Les contenus des numéros de LA REVUE 3EI avec le prolongement de certains articles...
- Une bourse d'échange de cours, de travaux pratiques, de maquettes, de documentations et d'idées...
- Des tests de matériels, d'équipements, de logiciels, de livres, de site web de la spécialité...
- Des informations officiels textes, décrets, modalités pratiques des épreuves
- Des information pratiques : bonnes affaires, salon, stage et journées de formation en entreprise...
- Des espaces de dialogue, une liste de diffusion et une lettre d'information...
- L'adresse de partenaires industriels ou pédagogiques, de fournisseurs et de distributeurs...
- Et bien d'autre chose que vous ne manquerez pas de proposer.

Pour vivre ce site a besoin de nouveaux collaborateurs afin d'animer les différentes rubriques. Pour exister le site a besoin de nos contributions (cours, TD, TP, maquettes, info...). Alors consultez-nous à <http://www.lesite3EI.com> ou écrivez-nous à [Florence.vadee@wanadoo.fr](mailto:Florence.vadee@wanadoo.fr)

© Ternité

Porte de travail



**SOCIÉTÉ de l'ÉLECTRICITÉ, de l'ÉLECTRONIQUE et des  
TECHNOLOGIES de l'INFORMATION et de la COMMUNICATION.**

48, rue de la Procession 75 724 PARIS CEDEX 15

Tel : 01 44 49 60 00 fax : 01 44 49 60 49

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

**La REVUE 3EI** publication trimestrielle du **Cercle Thématique 13-01 de la SEE :**  
**Enseignement de l'Electrotechnique et de l'Electronique Industrielle.**

<p><b>Edition</b> SEE 48 Rue de la Procession 75 724 PARIS CEDEX 15</p> <p><b>Directeurs de la publication</b> Marie-Michèle LE BIHAN Gérard DELAVIER</p> <p><b>Rédacteur en Chef</b> François BOUCHER</p> <p><b>Equipe de Rédaction</b> Yasmine FAJOLES Gilles FELD Brigitte GRELAUD Jean-Philippe ILARY Pascal LOOS Philippe NEVEU Michel THION</p> <p><b>Site WEB (en préparation)</b> Responsable Philippe LE BRUN</p> <p>Fabrice BAUDOIN Jean-Pierre TAREL Jean-Philippe ILARY</p> <p><b>Comité de lecture</b> Jean-Pierre CARON (ENSAM Lille) Jean FAUCHER (ENSEEIH) François FOREST (Univ. de MontpellierII) Michel LAVABRE (ENS Cachan) Michel MEUNIER (SUPELEC) Bernard MULTON (ENS Cachan, Antenne de Bretagne) Jean-Marie PETER (SEE)</p> <p><b>Abonnement annuel</b> Année scolaire 1999/2000 180 F TTC les 4 numéros (France et CEE) 240 F TTC pays hors CEE</p> <p><b>Réalisation et impression (1000 ex)</b> Repro-Systèmes 23, rue de Verdun 77 181 Le Pin</p> <p><b>Routage et Expédition</b> Départ Presse ZI les Richardets 93 966 Noisy le Grand</p> <p>Dépôt Légal: Mars 2000 Commission Paritaire 1202 G 78028 ISSN 1252-770X</p>	<p style="text-align: right;"><b>Sommaire du n°20</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Thème : les énergies renouvelables.</b></p> <p>p. 2 Editorial et questions posées aux lecteurs p. 3 Sommaire. p. 4-5 Publications.</p> <p><b>Thème : les énergies renouvelables</b></p> <p>p. 6 Captage de l'énergie solaire dans l'espace et transmission par micro-ondes F. COSTA, E. LABOURE, Lésir, ENS Cachan p. 14 Les petites centrales hydrauliques. S. PERRIN IUT de Saint Dié. p. 24 Utilisation de l'énergie éolienne dans la production d'électricité. A. TOUNZI L2Ep, USTL Lille. p. 39 Eoliennes et vitesse variable. M. BUDINGER LEEI, ENSEEIHT, D. LERAY LGMT, INSA Toulouse, Y. DEBLEZER Jeumont Industrie.</p> <p><b>Epreuve professionnelle de synthèse en STS Electrotechnique</b></p> <p>p. 45 Alimentation en eau d'une bergerie avec pompage au fil du soleil. A. BERARD, C. GARNIER, F. PIALAT, Lycée Ph. De Girard, Avignon.</p> <p><b>Energies alternatives.</b></p> <p>p. 52 Cuisine au biogaz et au soleil : expérimentation et adaptation aux réalités tropicales. H. RICARD, Lycée C. ADER, Athis-Mons.</p> <p><b>Matériel pour travaux pratiques.</b></p> <p>p. 58 Commande numérique de thyristors. P. JOUBERT ENS. Cachan.</p> <p><b>Histoire des sciences.</b></p> <p>p. 64 Faraday et le développement de l'électricité. J. C. BOUDENOT, Thomson CSF Communications.</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'œuvre 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).

## PUBLICATIONS - NOUVEAUTES

### SYSTEMES ELECTROTECHNIQUES

#### Applications industrielles Problèmes et solutions

Jean-Pierre CARON, Jean-Paul HAUTIER Editions Technip -288 pages-220 F

Cet ouvrage clair et abondamment illustré, propose douze études de systèmes électrotechniques, avec leurs solutions technologiques et la modélisation en vue de la commande, pour lesquelles la maîtrise des domaines électrique, électronique, électromagnétique, automatique et thermique est indispensable.

Les problèmes présentés ici relèvent tous d'applications industrielles ou d'études avancées concernant le transport, la distribution, et le conditionnement de l'énergie électrique. Ils comportent chacun des objectifs, un contexte applicatif et des mots-clés précisant le vocabulaire et la méthodologie. Ils concernent principalement :

- l'application des électro-aimants à l'appareillage des transformateurs en distribution,
- l'intérêt du couplage entre convertisseurs statiques électroniques et électromagnétiques pour l'optimisation d'un transfert d'énergie entre deux réseaux .
- les défauts de réseaux de transport,
- l'apport de la vitesse variable par machines synchrones et asynchrones dans les domaines de la traction électrique ( ferroviaire et levage ),
- l'application au contrôle d'effort dans les machines-outils agiles utilisées en usinage à grande vitesse,
- l'intérêt de la conversion statique électronique en dépollution harmonique des réseaux et en élévation de tension.

Le lecteur explore ainsi une problématique large lui permettant d'acquérir les notions importantes en génie électrique .

La recherche de solutions met en oeuvre des méthodes respectant les principes de la causalité naturelle; la démarche est la même dans la phase d'analyse pour la modélisation et dans la phase de conception des commandes.

### CONVERTISSEURS STATIQUES

#### Méthodologie causale de modélisation et de commande

Jean-Pierre CARON, Jean-Paul HAUTIER Editions Technip 1999-320 pages, 210 figures et tableaux, prix: 290 F.

Ce livre présente une méthodologie qui permet d'abord d'appréhender le fonctionnement particulier des convertisseurs électroniques de puissance, puis de définir les lois de leur commande dans un contexte donné d'application. Il complète utilement les ouvrages déjà existants sur le sujet; en effet, il ne s'agit pas d'une classification de montages mais d'une proposition de formalisme simple et suffisamment général pour leur modélisation et leur commande.

L'ouvrage est abondamment illustré et les propositions sont développées sur la base d'exemples significatifs permettant au lecteur l'assimilation rapide des concepts proposés.

Le professeur Guy SEGUIER conclut sa préface de la façon suivante: "Je suis persuadé que, vu son importance et sa qualité, cet ouvrage réalisé par Jean-Paul Hautier et Jean-Pierre Caron connaîtra un vif succès auprès de la communauté scientifique des électroniciens de puissance et constituera une source de progrès pour notre discipline".

### LES INSTALLATIONS ELECTRIQUES

Patrick Lagonotte Editions SEE-HERMES-384 pages- voir offre en page III de couverture

Le domaine des installations électriques est très vaste, ce qui nécessite bon nombre de professionnels et d'entreprises à se spécialiser dans certaines catégories (HT, BT) ou types d'installations (industrielle, tertiaire, domestique), ou encore type de service (bureau d'étude, homologation de conformité ou de sécurité, entretien et rénovation). D'un point de vue économique, cette activité industrielle est loin d'être négligeable, puisque l'appareillage basse tension représente 27% et les fils et câbles représentent 31% du chiffre d'affaires de la construction électrique.

Ce domaine de l'électrotechnique est en constante évolution par l'amélioration des normes et du matériel. C'est par la connaissance des règles de sécurité, des phénomènes physiques mis en jeu que cet ouvrage tente de structurer les différentes notions et connaissances permettant d'aborder les normes, le dimensionnement et la construction des installations électriques .

Cet ouvrage avant tout pédagogique comporte plus de 306 figures et 64 tableaux, et s'adresse aux étudiants et enseignants des sections de B.T.S et d'I.U.T, des I.U.P et des écoles d'ingénieurs soucieux d'aborder ce domaine du génie électrique.

---

REE REVUE DEL' ELECTRICITE ET DEL' ELECTRONIQUE

---

48 rue de la procession, 75 724 Paris CEDEX 15

N°11 Décembre 1999 Revue de la S.E.E 108 pages

Les nouvelles technologies de production d'énergie

voir offre spéciale réservée aux abonnés de *la Revue 3EI* en page IV de couverture.

Les moyens de production d'électricité suscitent actuellement des débats importants au sein de notre société . L'émergence de nouvelles technologies en accroît encore la passion avec notamment l'arrivée des moyens de production décentralisés de petite puissance . L'objet de ce dossier technique, qui constitue un outil de base pour toute réflexion sur ce sujet, est de dresser un panorama aussi large que possible qui donne un aperçu des différents moyens qui seront disponibles à l'horizon 2005 pour des investissements à réaliser en Europe Occidentale . Les différents articles sont les suivants :

- Présentation. *Par J-P.Jacquot*
- La production d'électricité d'origine nucléaire. *Par R.Serres*
- La chaudière à lit fluidisé circulant: mariage de l'écologie et de l'économie ? *Par G.Labat*
- Centrales hydroélectriques et apport de la vitesse variable. *Par G.Hémery et J.Coulon*
- Production électrique avec gazéification intégrée. *Par A.Bernard*
- Les centrales à cycle combiné. *Par C.Kempf*
- L'énergie éolienne : une énergie d'hier et de demain. *Par J-M Germa et P.Lagandré*
- L'électricité photovoltaïque . *Par J-L .Bal*
- Les micro-turbines pour la production décentralisée d'énergie. *Par J-L.Meyer et F.Ribes*
- Les piles à combustibles : une technologie propre. *Par J.Loughead et S.Pyke*
- La co-génération pour la production décentralisée d'énergie. *Par P.Barroyer*
- La production d'énergies au moyen de systèmes diesels modernes. *Par T.De Neef, B.Mouille et P. A.Destailleur*

# CAPTAGE DE L'ENERGIE SOLAIRE DANS L'ESPACE ET TRANSMISSION PAR MICRO-ONDES

F. COSTA, E. LABOURE

ENS Cachan LESIR UPRESA 8029

61, Avenue du Président Wilson, 94230 Cachan

## 1. INTRODUCTION

*Cet article présente une perspective très futuriste de l'utilisation des énergies renouvelables puisqu'il s'agit de capter l'énergie solaire dans l'espace grâce à des photopiles puis de l'acheminer sur terre par faisceaux de micro-ondes. Le concept paraît surprenant, cependant de nombreuses études ont été réalisées sur sa faisabilité depuis une quarantaine d'années et des travaux sont toujours en cours. Par ailleurs, un congrès international annuel sur ce thème existe depuis une petite dizaine d'années et quelques expériences commencent à voir le jour. Nous ferons ici une synthèse historique et technique de ce projet en montrant les difficultés à vaincre.*

## 2. TRANSMISSION SUR GRANDES DISTANCES PAR MICRO-ONDES

### 2.1. Historique :

L'utilisation de faisceaux micro-onde pour la transmission de puissance date du début des années 1950. L'observation spatiale étant inexistante et, dans le contexte de la guerre froide, l'armée américaine envisagea des plates-formes d'observation hélicoptères stationnaires en haute altitude (15 000m) et qui seraient restées postées sur de longues périodes, d'où l'idée l'apport d'énergie par faisceaux directifs micro-ondes. La société Raytheon au travers des travaux de William C. Brown, spécialiste de la fabrication de tubes d'émission micro-onde participa initialement à ce programme (projet RAMP : Raytheon Airborn Microwave Platform 1959). L'utilisation de micro-ondes ( $\lambda$  de l'ordre de 10cm, fréquence de l'ordre de 3GHz) est nécessaire afin de pouvoir utiliser des réflecteurs et des lentilles de tailles raisonnables pour focaliser le faisceau. On démontra qu'il est théoriquement possible de transmettre de l'énergie micro-onde avec un rendement proche de 100% [1].

A cette époque existaient différents problèmes liés à la technologie disponible :

- la nécessité de tubes d'émission de forte puissance avec un bon rendement ( seul existait le Klystron limité à quelques 100W et d'un rendement de l'ordre de 40%).

- la nécessité de convertir avec un bon rendement l'énergie micro-ondes en courant continu, ce qui nécessitait des diodes VHF performantes inconnues à l'époque. Le concept d'antenne redresseur (rectenna) apparut : c'est une structure qui intègre le dipôle récepteur, un filtre anti-harmoniques et le redresseur, le principe sera détaillé plus loin.

La première réalisation eut lieu en 1963 sur une maquette de plate-forme hélicoptère guidée en altitude par des câbles, un faisceau de 400W transmettait une puissance de 100W à un petit moteur à courant continu

qui entraînait une hélice. Le rendement total fut de 13%.

Les années suivantes des progrès sur la conception de l'antenne redresseur et des diodes à l'état solide permirent d'augmenter significativement le rendement de transmission [2].

1964 : 4480 diodes à pointe sont nécessaires pour obtenir 270W pour une masse de 5,5kg/kW DC, la plate-forme est sustentée à une hauteur de 20m.

1968 : on passe à 1kg/kW DC .

1971 : développement de diodes Schottky à l'AsGa en redresseur demi-onde, ce qui simplifie la structure de l'antenne.

1973 : le rendement de transmission passe à 27% pour une puissance reçue de 40W.

1975 : essai de transmission sur quelques mètres avec une antenne d'émission à ouverture gaussienne, le rendement obtenu (DC DC) est de 54%.

1975 : Au JPL, 30kW DC reçu pour allumer des lampes avec une antenne de 18m<sup>2</sup> sur une distance de 1600m avec un rendement (DC/micro-onde) de 84%.

1975 : démonstration de l'utilisation possible du magnétron de four à micro-onde avec un bon rapport signal/bruit et une bonne durée de vie.

1976-77 : Rectenna à deux plans : un plan récepteur (dipôle +diodes) et un plan réflecteur.

1983 : Rectenna en couche mince et un rendement micro-onde/DC de 85% pour un rendement massique de 1kW/kg.

Dans les années 80, la technologie émission/réception est mûre et on en vient à imaginer des applications différentes des objectifs initiaux avec des puissances transmises plus élevées. Les principaux projets sont décrits ci-dessous

### 2.2. Projet SPS (Solar Power Satellite)

Ce concept est introduit en 1968 par Peter Glaser [3], [6] : un satellite en orbite géostationnaire capte l'énergie solaire disponible en permanence grâce à des photopiles, cette énergie est ensuite envoyée sur terre par faisceau micro-ondes. Cette solution veut

représenter une alternative à la disparition des énergies fossiles et aux restrictions d'utilisation de l'énergie nucléaire pour cause d'écologie. Les équipements sont dimensionnés pour une puissance fournie de l'ordre de 5 gigawatt. Le satellite mesure 5200m x 10400m pour ce qui est de la surface de captage du rayonnement solaire. Celui-ci est de 1400W/m<sup>2</sup> dans l'espace, soit 40% de plus que sur terre avec un taux de disponibilité de 100%. Le rendement de cette première conversion est estimé à 15%. L'antenne d'émission à réseau présente un diamètre de 1000m. La source micro-onde est constituée par 100 000 tubes klystron de 70kW de puissance unitaire émise. Le rendement de transmission DC-DC est estimé entre 58 et 72% qui sont en réalité les chiffres atteints en laboratoire à faible niveau de puissance transmise. Les antennes réceptrices au sol sont elliptiques (10km x 13km) et captent l'énergie sous une densité de l'ordre de 100W/m<sup>2</sup> à 2.45GHz.

Notons que le coût actuel du lancement et de l'assemblage en orbite géostationnaire d'un tel satellite est d'un coût inabordable.

Récemment (1997), la NASA a réactivé cette idée avec une approche plus modulaire et standardisée de façon à pouvoir lancer des modules par des fusées classiques. Par ailleurs, des progrès sensibles ont été réalisés sur les différents maillons technologiques, en particulier sur les cellules solaires pour lesquelles le rendement approche 25%. Le concept de tour solaires est apparu fournissant une puissance de 100 à 400MW pour un coût de 8 à 15 Milliards d'Euro, ce qui représente une réduction d'un facteur 30 par rapport au concept initial, soit un prix variant de 20 à 40 Euro/Watt.

Le tableau suivant permet de comparer les coûts au Watt en capital (investissement à réaliser) et en production pour diverses sources d'énergies. Il apparaît clairement que la solution SPS est encore peu compétitive, mais qu'elle est susceptible de le devenir à moyen terme.

	charbon	gaz	nucl.	hydro	solaire	SPS
coût capital Euro/W	3,2	1,8	3,5	5,3	13	20/40
coût de production c/kWh	5	3	4,5	3	6	4

### 2.3.Projet LEO to GEO (Low Earth Orbit to Geostationary Orbit) :

C'est un projet de véhicule spatial permettant le transfert de fortes charges (50T) d'une orbite basse à l'orbite géostationnaire en utilisant des propulseurs ioniques (Xénon) alimentés en énergie électrique transmise par faisceau micro-ondes depuis la terre [3]. L'énergie transférée est de 20MW et nécessite une surface d'antenne de 50 000m<sup>2</sup>. Ce système nécessite l'installation de stations d'émission réparties autour de

l'équateur pour assurer la continuité de fourniture en énergie à la station spatiale.

### 2.4.Projet PRS (Power relay satellite)

Il consiste en un satellite réflecteur situé en orbite géostationnaire qui assure le transfert d'énergie depuis une station d'émission dans une zone éloignée à une station de réception proche d'utilisateurs, c'est à dire du transport sur de très longues distances.

### 2.5.Projet HALE (High Altitude Long Endurance aircraft)

C'est un avion sans pilote volant à une altitude de 20km durant plusieurs mois ou semaines pour assurer une fonction de relais de télécommunications ou de station météo de haute altitude, cette solution étant nettement moins onéreuse qu'un satellite.

### 2.6.Projet WPT (Wireless Power Transmission) à la Réunion

Pour finir, citons le projet démonstrateur sur l'île de la Réunion d'une transmission sans fil de 10kW sur 700m par micro-ondes à 2,45GHz pour assurer la fourniture d'énergie à un village isolé (site de Grand Bassin). La densité d'énergie du faisceau est de 25mW/cm<sup>2</sup>. Le respect du cadre environnemental a conduit à choisir cette solution. Le coût estimé est de l'ordre de 4MF. Le rendement global visé est de 20%, l'énergie est fournie par le réseau EDF.

## 3.PRINCIPE DE LA TRANSMISSION ET LIMITATIONS :

### 3.1.Principe

Le principe consiste à transformer une puissance continue en énergie micro-onde (de longueur décimétrique) à transmettre cette énergie via une antenne directive et à assurer la conversion inverse sur une antenne redresseur de réception. Le schéma de principe est représenté figure 1.



Figure 1 : principe de la transmission

Le faisceau micro-onde présente différentes zones dans lesquelles il a des propriétés spécifiques. On distingue :

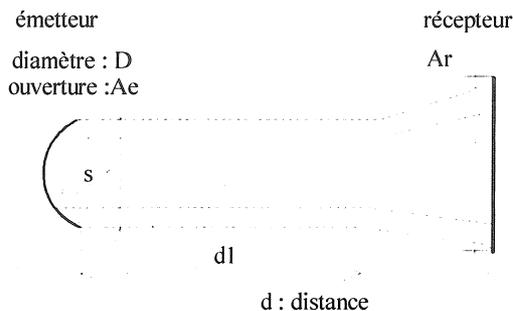


figure 2 : diffraction du faisceau micro-onde

- une zone dans laquelle l'énergie reste concentrée à 90% à l'intérieur d'un faisceau tubulaire, elle s'étend jusqu'à une distance  $d_1 = D^2/2\lambda$ , D est le diamètre de l'ouverture rayonnante. C'est la zone de Rayleigh.
- une zone où le faisceau commence à diverger, comprise entre  $d_1$  et  $d_2 = 2D^2/\lambda$ . C'est la zone de Fresnel.
- une zone dite de Fraunhofer où le faisceau devient omnidirectionnel.

L'application en terme de transfert d'énergie ne peut se concevoir que dans les premières zones.

### 3.2. Rendement de transmission

Plusieurs paramètres permettent de définir les caractéristiques et le rendement de la transmission : L'expression de la densité de puissance  $\chi$  obtenue au centre de l'ouverture de réception, dans l'axe de l'ouverture d'émission de surface  $A_e$ , à une distance d, délivrant une puissance P avec un rayonnement micro-onde de longueur  $\lambda$  est donnée par :

$$(1) \quad \chi = \frac{A_e \cdot P}{(\lambda \cdot d)^2}$$

Cette expression montre l'intérêt de travailler avec une faible longueur d'onde pour maximiser  $\chi$ .

Le rendement de la transmission dépend des paramètres  $A_e$ ,  $A_r$ , d, l. On définit un paramètre normalisé  $\tau$  :

$$(2) \quad \tau = \frac{\sqrt{A_e \cdot A_r}}{\lambda \cdot d}$$

La courbe (figure 3) suivante résultant des calculs de [1] précise l'évolution du rendement de transmission (puissance reçue/puissance émise) en fonction de  $\tau$ .

On constate donc la possibilité de transmettre de la puissance avec un rendement proche de 1. On remarque toutefois que la taille de l'ouverture d'émission croît avec la distance sur laquelle on veut transférer la puissance. En supposant  $\lambda = 10\text{cm}$  ( $F = 3\text{GHz}$ ), un rendement de transmission de 95%, soit  $\tau = 2$ , et en supposant de plus que l'ouverture d'émission est quatre fois plus petite que celle de réception,

$A_r = 4 \cdot A_e$ , on en déduit une relation entre le diamètre de l'antenne d'émission et la distance de transmission :

$$(4) \quad D = 0.36 \cdot \sqrt{d}$$

D et d en mètre

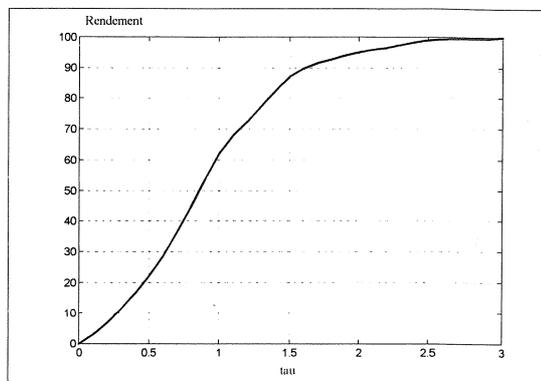
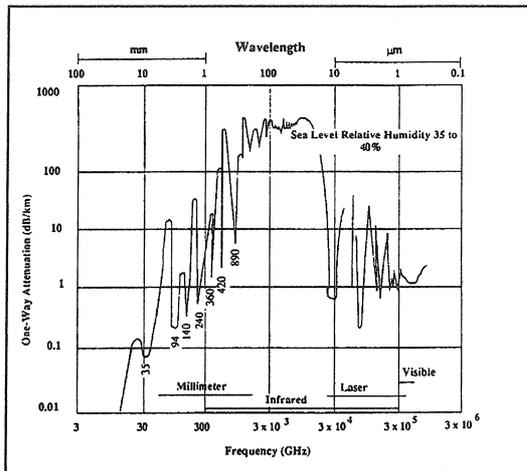


Figure 3 : rendement de transmission

Une transmission sur 10km nécessite donc une antenne de 36m de diamètre, ce qui paraît peu réaliste. On est donc amené à accepter une dégradation du rendement de transmission pour obtenir des dimensions d'antenne acceptable. Par exemple le projet SPS est dimensionné avec  $\tau$  de l'ordre de 0.9 ce qui assure un rendement de transmission de l'ordre de 60%. Le projet sur l'île de la Réunion de transmission de puissance de 10kW est dimensionné pour un rendement global de 20%, soit un rendement de transmission de l'ordre de 50%.

Le choix de la fréquence est important à plusieurs titres : il influe sur le rendement de transmission comme le montrent les équations (1), (2) et (3). Par ailleurs, il dépend des propriétés physiques du milieu dans lequel s'opère la propagation. Il n'y a pas de restriction dans le vide, il est alors intéressant de travailler à la fréquence la plus élevée possible, compatible avec un bon rendement des tubes d'émission et du dispositif de réception. La gamme de 35GHz semble bien adaptée à la technologie actuelle des tubes d'émission. Par contre dans l'atmosphère, le rendement décroît fortement au delà de 3GHz à cause de la présence de molécules d'eau, la fréquence de 2.5GHz est intéressante car il est possible d'utiliser des magnétrons (puissance de l'ordre du kW) en réseau, analogues à ceux utilisés en chauffage micro-onde ou des klystrons. Le rendement est de l'ordre de 70% pour ces technologies. Même si l'atténuation dans l'atmosphère augmente fortement pour des fréquences supérieures à 3GHz, il existe cependant quelques fenêtres comme le montre la courbe 4. Notamment la fenêtre à 35GHz peut être intéressante pour des transmissions de quelques dizaines de kilomètres.



Courbe 4 : atténuation atmosphérique en fonction de la fréquence

Les aspects théoriques à aborder pour maîtriser ces concepts sont :

- la réflexion d'onde sur une paroi : pour l'émission par une antenne de type parabole [4]
- le rayonnement d'une ouverture : pour connaître la répartition de la densité de puissance au niveau de l'ouverture et son diagramme de rayonnement. La répartition du champ E dans l'ouverture est la transformée de Fourier du diagramme de rayonnement. Ce résultat est important pour optimiser le rayonnement de l'antenne et notamment éviter les lobes secondaires. La répartition gaussienne du champ dans l'ouverture permet d'éviter ce problème [1], [4], [5].
- la théorie de la diffraction pour la dispersion du faisceau [4].

### 3.3. Les sources micro-onde [10]

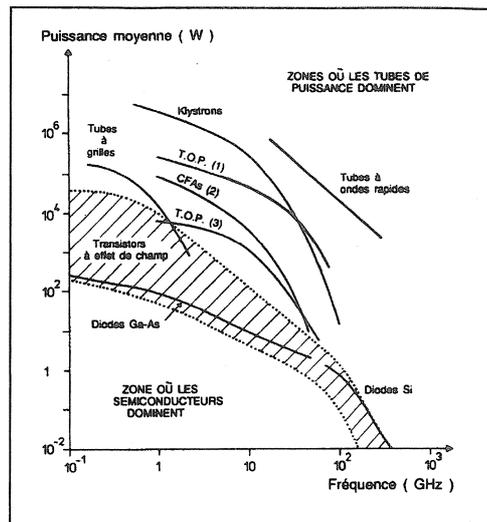
Les sources de micro-onde de puissance sont essentiellement des tubes à vide. Leurs domaines d'application actuel se situent dans les télécommunications, le radar et les applications d'instrumentation scientifique et médicale (accélérateurs). Leur gamme de fréquence s'étend de 1 à 30GHz. Les semi-conducteurs de puissance (As-Ga) adaptés à la gamme 1GHz-30GHz ne dépassent pas quelques dizaines de watt. La courbe 5 présente dans un plan puissance/fréquence, les technologies de sources micro-ondes disponibles.

Le fonctionnement des tubes est basé sur l'interaction entre un champ magnétique et un champ électrique RF : l'énergie cinétique ou potentielle acquise par les électrons est cédée au champ électromagnétique.

Parmi les tubes de puissance, on distingue :

- les klystrons : ce sont des tubes amplificateur bande étroite à plusieurs cavité résonnantes. Le principe du klystron est de moduler longitudinalement la vitesse d'un faisceau électronique par un champ électrique RF. Il y a ainsi formation de paquets d'électrons qui se déplacent. La modulation de vitesse se traduit par la modulation du courant électronique.

Ce courant induit par résonance de la cavité de sortie un champ RF. Ce principe est représenté figure 6.



Courbes 5 : technologies de sources micro-ondes

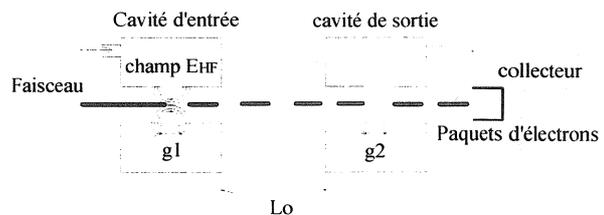


Figure 6 : principe du klystron

Pour augmenter le gain, plusieurs cavités sont placées en cascades. La limite en gain se situe aux environs de 90dB. En accordant différemment les diverses cavités, il est possible de réaliser une amplification à bande élargie. Le rendement varie de 40 à 70%, les pertes résultent de l'énergie cinétique des électrons venant collisionner le collecteur du faisceau. Il est impérativement muni d'un dispositif de refroidissement.

La gamme puissance/fréquence de ce type de composant est donnée par le tableau suivant [7]:

Puissance (kW)	Rendement	Fréquence
1	50-70%	1,3 à 18 GHz
50	25-35%	400-900 MHz: bande TV VHF/UHF
1000 (impulsions)	65-70	300 MHz

- Le magnétron [8], [9] : c'est un tube oscillateur. Différents modèles existent, notamment dans les applications de chauffage industriel ou domestique (four à micro-ondes). La gamme de puissance s'étale de quelques centaines de watt à environ 10kW pour la fréquence industrielle de 2.45GHz. Les rendements maximaux obtenus sont de l'ordre de 70%.

La structure de ce dispositif est représentée figure 7.

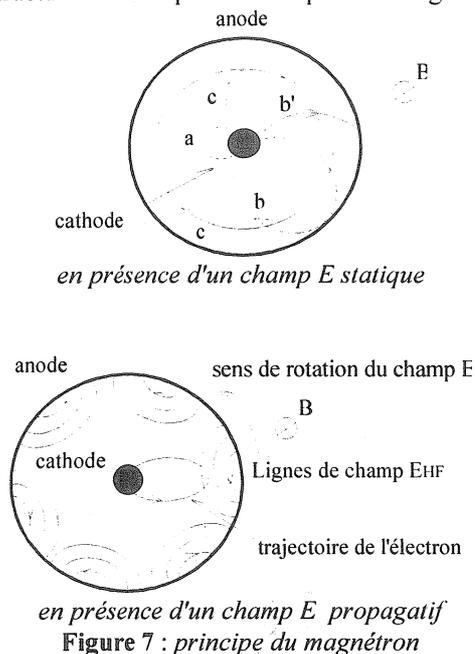


Figure 7 : principe du magnétron

Dans le cas de polarisation par un champ électrique statique  $E_0$ , un électron émis par la cathode est accéléré par l'anode. En présence d'un champ magnétique transversal  $B$ , sa trajectoire s'incurve. Plusieurs cas sont possibles selon l'intensité du champ  $B$  :

- l'électron décrit une trajectoire a) qui le ramène sur la cathode : il n'y a pas de courant
- l'électron est attiré par l'anode et y cède son énergie cinétique b') ou il frise l'anode et revient sur la cathode à vitesse nulle b) : un courant apparaît
- l'électron n'atteint pas la cathode mais se déplace autour de la cathode c). L'électron possède une vitesse particulière  $V_e = E_0/B$  telle que la force exercée par le champ électrique compense celle exercée par le champ magnétique.

Si on ajoute au champ  $E_0$  statique un champ RF définit par :

$$E_1 = E_{HF} \cdot \exp(j(\omega t - \beta z))$$

sa vitesse de phase (ou de propagation) vaut :

$$V_p = \omega/\beta.$$

La propagation de ce champ sur l'anode est analogue au champ tournant d'une machine. Le transfert entre l'énergie cinétique de l'électron et le champ n'est possible que s'il y a synchronisme entre la vitesse  $V_e$  et la vitesse de propagation  $V_p$  du champ  $E_{HF}$ . Un électron émis par la cathode avec la vitesse initiale  $V_0$  va se trouver ralenti pour atteindre la vitesse du champ  $V_p$ . le différentiel d'énergie  $w = e(V_0 - V_p)$  est cédé au champ électromagnétique. Les électrons émis qui ne participent pas à cet échange contribuent à dégrader le transfert d'énergie, ce qui explique le rendement inférieur à 1. En réalité le phénomène concerne un ensemble d'électrons dont la trajectoire tourbillonnaire

autour de la cathode finit par atteindre l'anode (sinon il n'y aurait pas de courant) en cédant son énergie potentielle.

L'anode est constituée de cavités résonnantes qui constituent une ligne fermée sur elle-même dans laquelle se propage le champ  $E_{HF}$ , la ligne possède donc plusieurs modes propres, dont un (mode  $\pi$ ) est accordé sur la vitesse de rotation des électrons. L'oscillation démarre sur le bruit propre de la structure.

Le signal est prélevé par une boucle couplée à une des cavités, noter que du fait de l'existence possible de plusieurs modes, le signal de sortie possède une pureté spectrale moins grande que dans le cas d'amplification par klystron. Enfin sa durée de vie est plus faible que celle du klystron.

D'autres variétés de tubes existent : gyrotrons, tubes à ondes progressives, mais leurs rendement inférieur à 30% ne permettent pas actuellement de les utiliser en transmission d'énergie, des études sont en cours pour améliorer leurs performances.

### 3.4. Technologie de réception

Le convertisseur d'énergie micro-onde-courant continu est une antenne intégrant un filtre HF, un redresseur et un filtre BF. Ce dispositif est dénommé rectenna (rectifier-antenna). L'antenne est constituée de dipôles élémentaires associés en séries parallèles comme représenté sur la figure 8. Pour augmenter le rendement de réception, un réflecteur est associé au réseau de cellules.

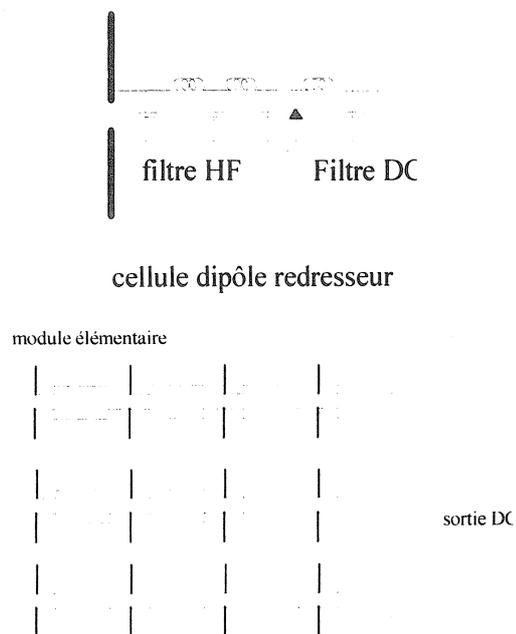


Figure 8 : principe du rectenna

La présence du filtre HF passe-bas du cinquième ordre en sortie du dipôle demi-onde permet d'éviter la circulation dans celui-ci des courants harmoniques générés par le redresseur. La cellule de filtrage

classique LC en sortie permet de restituer la composante continue de tension redressée. La charge de sortie doit être adaptée pour un rendement optimal de la cellule comme l'indique la courbe de la figure 9. Les filtres sont directement réalisés par des motifs ajoutés à la ligne reliant le dipôle à la sortie DC. Cette technique est actuellement parfaitement maîtrisée [3], [11], [13], [14].

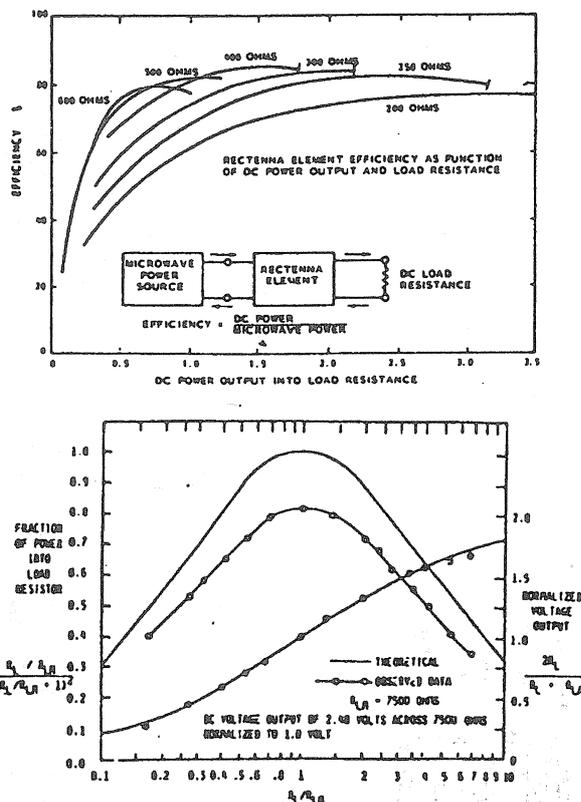


Figure 9 : évolution du rendement de la cellule en fonction de la résistance de charge

Des études [11] ont montré l'intérêt d'établir un modèle de la diode schottky à l'AsGa pour optimiser le rendement de la cellule. Un modèle à composants non-linéaire a été proposé dans cette étude.

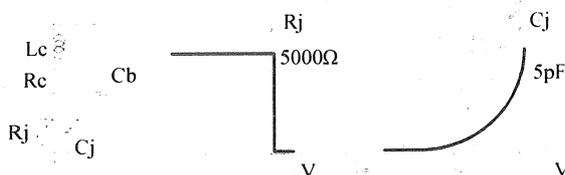


Figure 10 : modèle de la diode RF

Il ressort qu'à 2.45GHz, un rendement de 85% peut être obtenu pour une puissance restituée de 10W. La diode détermine essentiellement le rendement, ainsi que son adaptation aux impédances des circuits de charge et de filtre. Il a été constaté que le rendement optimal est obtenu pour une résistance de charge égale à environ 1.3 à 1.4 fois la résistance d'entrée de la diode.

Le rendement se dégrade jusqu'à environ 70% à une fréquence de fonctionnement de 35GHz. Cette étude a de plus montré que le rendement de conversion est amélioré par la présence du filtre qui élimine les harmoniques de commutation. A cette fréquence une partie de la puissance de l'ordre de 10% est dissipée dans la structure.

Un des inconvénients de la structure présentée concerne le dipôle demi-onde de réception. Il est également accordé pour les harmoniques d'ordre supérieur et favorise donc la re-émission des harmoniques de redressement, ce qui contribue à dégrader le rendement. Pour minimiser ce problème, il a été proposé d'utiliser une antenne boucle qui ne peut résonner sur les ordres supérieurs [16]. Toutefois le rendement expérimentalement obtenu avec cette technique ne dépasse pas significativement les chiffres déjà cités (de l'ordre de 70%).

### 3.5. Pointage du faisceau

Le pointage du faisceau est nécessaire dans les applications où les antennes sont susceptibles de bouger l'une par rapport à l'autre. Le rendement de transmission et la sûreté de fonctionnement imposent que la densité maximale de puissance du faisceau coïncide avec le centre de l'antenne réceptrice. Plusieurs techniques ont été proposées pour assurer le guidage du faisceau, elles supposent que le faisceau puisse être dirigé à l'émission et que l'antenne de réception soit munie de capteurs adéquats pour assurer le retour d'informations de guidage [13].

Le pointage peut être obtenu de deux façons : mécaniquement ou par utilisation d'antennes émettrices à balayage électronique [5].

Les principes de détection du faisceau sur l'antenne de réception sont illustrés sur les figures 11 et 12.

Deux capteurs de champs (antennes de mesure) sont disposés selon les axes NS et EW de l'antenne de réception. Le signal d'erreur est constitué par la mesure de la différence d'intensité du champ E reçu par chaque capteur :  $\epsilon = V_1 - V_2$ .

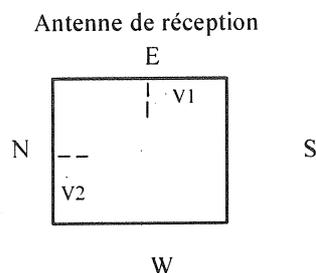


Figure 11 : capteurs associés à l'antenne de réception

L'antenne de réception est subdivisée en quatre aires égales selon les directions NS et EW. Une mesure de puissance ( $P_1, P_2, P'_1, P'_2$ ) est effectuée pour chaque zone. Un signal d'erreur est fourni dans chacune des directions NS et EW par la mesure de la différence de puissance dans les demi-plans correspondants comme indiqué :

$$(5) \quad \varepsilon_{ns} = (P_1 + P'_1) - (P_2 + P'_2)$$

$$(6) \quad \varepsilon_{ew} = (P_1 + P_2) - (P'_1 + P'_2)$$

Le principe de guidage consiste donc à annuler l'erreur dans chaque direction pour assurer une illumination uniforme de l'antenne et le centrage du faisceau.

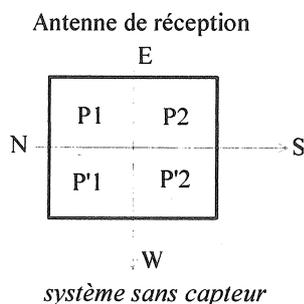


Figure 12 : principe de guidage du faisceau sans capteur

La vitesse de poursuite de la cible est liée à sa taille. Les études proposées [15] suggèrent que l'erreur de pointage ne doit pas dépasser le 1000ème du diamètre de l'antenne de réception. Selon sa vitesse de déplacement, on obtient donc la période d'échantillonnage des informations de pointage. Cette contrainte peut donc être assez sévère en terme de contrôle pour des mobiles rapides tels des avions sans pilotes.

### 3.6. Les réalisations existantes

Très peu de réalisations ont émergé des laboratoires, et aucune ne fait l'objet d'un développement industriel. Paradoxalement, beaucoup d'articles sont publiés sur le thème et un congrès mondial (SPS) est organisé tous les deux ans depuis 1991. Les différentes équipes étudient plutôt tel ou tel maillon de la chaîne. Citons les quelques projets plus finalisés étant apparu dans la bibliographie :

- Projet du centre de recherche en communication canadien, octobre 1987, petit avion sans pilote, la puissance reçue est de l'ordre du kW.
- Projet SPS 2000 à l'étude au Japon pour la transmission de 10MW depuis une orbite basse (1100km). Projet papier de faisabilité pour déterminer les lacunes technologiques et évaluer les coûts [17], un démonstrateur de l'ordre du Watt a été présenté au cours du congrès SPS94 au Japon (Sagamihara 1994).
- Projet à Grand Bassin (île de la réunion), transmission sur 700m pour fournir 10kW avec un rendement global de l'ordre de 20%. Les études sont encore en cours [18].

### 3.7. Les limitations du principe

Actuellement les limitations sont de trois ordres, technologiques biologique et politique. Concernant ce dernier point, le CISPR organisme international qui

régit l'attribution des fréquences refuse l'accord pour ce type applications de transfert d'énergie à 2.45GHz pour les raisons suivantes :

- interférences avec les télécommunications
- interférence avec l'observation astronomique
- effets physiologiques non connu [12].

Concernant le premier point, les difficultés technologiques se situent par ordre de difficultés décroissantes :

au niveau de l'émission : le rendement des tubes à micro-ondes est encore faible : 40-70% au mieux et se dégrade avec la gamme de fréquence et de puissance. La modélisation de ces composants est encore loin d'être parfaite et il est encore beaucoup fait appel à l'expérimentation pour leur mise au point. Ce thème est probablement à approfondir. Des solutions en terme de sources à l'état solide (semi-conducteur de puissance) sont peut-être à envisager. A l'heure actuelle les transistors micro-onde de puissance ne dépassent pas la gamme 1-10W, mais des associations de sources en vastes réseaux sont peut-être à envisager.

au niveau de l'antenne d'émission : il faut pouvoir optimiser la directivité du faisceau et notamment éviter les lobes secondaires, sources de dégradation du rendement de transmission et d'agression sur l'environnement naturel et humain. Une recherche est à envisager sur ce thème. Une seconde difficulté concerne la nécessité de diriger le faisceau pour certaines applications telles SPS ou l'alimentation de mobiles. Le contrôle du pointage du faisceau apparaît dans la littérature comme assez délicat. Des travaux sont à imaginer dans ce sens.

au niveau de la réception : le rendement des antennes redresseurs est de l'ordre de 85% au mieux. Il est donc nécessaire, compte tenu des niveaux de puissance envisagés, de l'améliorer. Ceci passe par le développement de diodes plus rapides et probablement d'une fabrication intégrée de l'antenne, de son réflecteur et du réseau de diodes. On butera néanmoins sur des limitations analogues à celles des capteurs optiques : la surface de connectique entre les réseaux limite le rendement de l'antenne en pratique.

Enfin la taille des antennes d'émission et de réception est un facteur limitatif au rendement de transmission, comme il a été suggéré plus haut.

Concernant les effets biologiques, la recherche bibliographique a montré que très peu d'études ont été réalisées dans cette direction. On se contente de citer une valeur d'exposition limite aux micro-ondes de 50W/m<sup>2</sup> sans préciser la gamme de fréquence ni la durée. Cependant pour assurer un bon rendement de transmission, tout en respectant cette limitation, il est nécessaire d'utiliser des antennes de très grande surface, ce qui pose des problèmes d'environnement, soit terrestre soit spatial.

#### 4. CONCLUSIONS

Compte tenu des éléments présentés, cette technique de transmission d'énergie est plutôt bien adaptée à la transmission espace-espace ou terre-espace. Dans ces situations, les contraintes biologiques et environnementales sont réduites et il est possible d'utiliser des fréquences élevées (>10GHz) de façon à réduire la taille des antennes. Les évolutions technologiques sur les dispositifs d'émission et sur les antennes de réception devraient permettre l'amélioration du rendement pour aboutir à des solutions économiquement viables. Les liaisons espace-terre ou terre-terre paraissent beaucoup plus contraignantes, compte tenu de la densité de puissance permise (50W/m<sup>2</sup>), de la gamme de fréquence possible (2,45GHz), et donc de la taille des antennes.

Il apparaît donc que ce type de transmission de puissance nécessitant de grandes surfaces de collecte ou d'émission n'est imaginable que pour le transport de très forte puissance essentiellement dans l'espace ou entre la terre (régions désertiques) et l'espace. Par ailleurs, se poseront de toute façon les problèmes du transport de cette énergie vers les centres de consommation. Les différentes études prospectives envisagent des expérimentations en grandeur réelle économiquement et écologiquement viables, à terme de cinquante ans, si effectivement les énergies fossiles deviennent rares à cette époque !

#### 5. BIBLIOGRAPHIE

- [1] "On the guided propagation of electromagnetic wave beam", Goubau, Schwering, IRE transactions on antennas and propagation, vol. AP9, pp.248-256.
- [2] "The history of power transmission by radio waves" W.C. Brown, IEEE transactions on micro wave theory and techniques, vol MTT-32, n°9, sept. 1984.
- [3] "Beamed Microwave power Transmission and its applications to space", W.C. Brown and E.E. Eves, IEEE transactions on microwave theory and techniques, vol. n°40, n°6, june 1992, pp.1239-1250.
- [4] "Dispositifs micro-ondes" Combes, éditions Masson 1982.
- [5] "Les micro-ondes", R. Badoual, éditions Masson 1984.
- [6] "Hyperfréquence, traité XIII", F. Gardiol, EPFL, éditions Dunod
- [7] "Energy transmission in space : an enabler technology", M. Toussaint, SPS91 Paris, pp285-295.
- [8] "Tubes pour hyperfréquences", G. Faillon, G. Fleury, E2355, Techniques de l'Ingénieur.
- [9] "Micro waves engeeniring and systems applications", E. A. Wolf, R. Kaul, Willey Interscience.
- [10] "Micro waves sources for power transmission in space", M. Firamin, SPS91, pp521-527.
- [11] "Theoretical and experimental investigation of a rectenna element for microwave power transmission", J.O. McSpadden, T. Yoo, K. Chang, iEEE transactions on microwave theory and techniques, vol 40, n°12, december 1992, pp2359-2366.
- [12] "The environmental impact of SPS: a social view", L.P. Lehman, G.E. Canough, proc. du congrès SPS91, pp.195-200, Paris, aout 1991.
- [13] "Combined antenna-rectifier arrays for power distribution systems", Fitzsimmons, Lund, Nalos, brevet US n° 4360741, 23/11/83.
- [14] "High frequency rectenna", Logan, Orvis, brevet US n°5043739, 27/08/91.
- [15] "A transportronics solution to the problem of interorbital transportation", W.C. Brown, B.W. Schupp, conf. "The window of
- [16] "Fundamental experiment of a rectenna array for microwave power reception", T. Ito, F. & M. Fujita, actes du congrès ISAP 92, Sapporo, Japon. pp.489-492.
- [17] "Development of a functional system model of the solar power satellite SPS2000", M. Omiya, K. Itoh, actes du congrès ISAP 96, pp.417-420, Chiba, Japon.
- [18] "Antenna design for wireless power transportation : the grand Bassin case study in Réunion Island", G. Pignolet, actes du congrès ISAP 96, pp.397-400, Chiba, Japon.

#### Sites WEB relatifs au concept SPS :

- <http://www.tier.net/sunsat>
- <http://netdepot.com>
- <http://www.spacefuture.com/power/power.shtml>
- <http://www.spacefuture.com/power/equatorialtimes>
- <http://www.reston.com/nasa/solar.sats.html>
- <http://www.nss.org>

## LES PETITES CENTRALES HYDRAULIQUES

Sylvain PERRIN

IUT de SAINT DIE Dép. GEII

### Résumé.

*Il n'existe plus guère de sites permettant de réaliser des centrales hydrauliques de forte puissance en Europe, la plupart des grands sites exploitables sont déjà équipés; en revanche l'accroissement de la production par la "petite hydroélectricité" autorise à prévoir une croissance de puissance de production de 300 MW chaque année.*

*Après un historique de l'exploitation de l'énergie hydraulique et une brève présentation des différents types de turbines utilisées, l'auteur expose les contraintes liées à la production d'électricité par des petites centrales et à celles liées au raccordement au réseau EDF.*

### HISTORIQUE.

Les premières machines transformant l'énergie hydraulique en énergie mécanique étaient les roues à eau qui furent utilisées jusqu'au siècle dernier. La première roue à axe horizontal actionnée par sa partie inférieure fut décrite par le romain VITRUVÉ au 1<sup>er</sup> siècle AV J-C. Une augmentation de la puissance fut obtenue au 2<sup>ème</sup> siècle en alimentant les roues dans leurs parties supérieures; des puissances de 50 ch furent atteintes au moyen âge. Les lois de l'hydraulique étaient mal connues jusqu'au 18<sup>ème</sup> siècle, les savants Daniel BERNOULLI (1700-1782) et Léonhard EULER (1707-1783) posèrent les fondements des lois de l'hydrodynamique, de l'écoulement des fluides et les principes des turbomachines.

Il fallut attendre le 19<sup>ème</sup> siècle pour voir apparaître, en 1827, la première turbine hydraulique réalisée par Benoît FOURNAYRON (1802-1867). Installée à Pont-sur-Orgeon en Haute Saône, elle développait une puissance de 6 ch avec un rendement de 80 %. Les années suivantes virent apparaître de nombreux autres types de turbines qui prirent le nom de leurs inventeurs: JONVAL, FONTAINE, James Bicheno FRANCIS (1815-1892), Lester Allen PELTON (1829-1908) et un peu plus tard Viktor KAPLAN (1876-1934). Il faut noter que la puissance des turbines a beaucoup augmenté avec l'apparition de l'électricité qui a permis de transporter l'énergie, sachant qu'auparavant l'énergie mécanique devait être consommée sur place.

### TRAVAIL PRODUIT PAR UN FLUIDE TRAVERSANT UNE MACHINE HYDRAULIQUE.

Ce travail est exprimé dans l'équation suivante :

$$\frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2) + \frac{1}{\rho}(p_2 - p_1) + g(z_2 - z_1) = W_{(1-2)}$$

$W_{(1-2)}$  correspond au travail d'une masse d'un kilogramme de fluide traversant une machine hydraulique :

$$\frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2) \text{ est une énergie cinétique ; } \frac{1}{\rho}(p_2 - p_1)$$

est une énergie de pression ;  $g(z_2 - z_1)$  est une énergie potentielle de pesanteur ;  $W_{(1-2)}$  est l'énergie fournie (pompe) ou consommée (turbine) par la machine hydraulique.

### Classement des différents types de turbines actuelles.

Les turbines peuvent être classées par leur hauteur de chute.

- Les turbines PELTON conviennent pour les hautes chutes d'une centaine de mètres à 2000 m ; ces turbines sont dites à action car la pression de l'eau à la sortie du distributeur est égale à la pression atmosphérique. C'est l'énergie cinétique du jet qui est utilisée ( $\frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2)$ ). Le débit maximal consommé par une turbine atteint 10 m<sup>3</sup>/s.
- Les turbines FRANCIS sont utilisées sur des chutes variant de quelques mètres à 500 m ; ce sont des turbines à réaction, car la pression de l'eau est différente de l'entrée à la sortie de la turbine. Ces turbines utilisent toute la hauteur de chute par l'adjonction d'un aspirateur à la sortie de la turbine. Ce sont les énergies cinétique ( $\frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2)$ ) et de pression ( $\frac{1}{\rho}(p_2 - p_1)$ ) qui sont utilisées. Le débit maximal consommé dépasse les 200 m<sup>3</sup>/s.
- Les turbines KAPLAN sont utilisées pour des chutes variant de un mètre à une centaine de mètres ; ce sont comme les turbines FRANCIS des turbines à réaction. Les turbines actuelles ont des rendements qui peuvent atteindre plus de 90%, ceci grâce aux

améliorations dans le tracé des roues, des distributeurs et des aspirateurs. Le débit maximal consommé atteint les 550 m<sup>3</sup>/s et n'est pas limité à cette valeur.

**Quelques exemples de réalisations :**

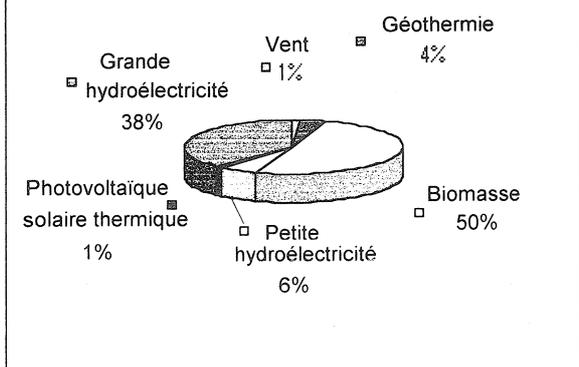
- Le site de REISSEK en Autriche est équipé de turbines PELTON de 23 MW sous 1752m de chute.
- Le site de ITAIPU au Brésil et au Paraguay est équipé de 18 turbines FRANCIS de 740 MW sous 121m de chute (le diamètre des roues atteint 8,1 m).
- Le site de KOYNA 4 en Inde est équipé de 5 turbines FRANCIS de 280 MW sous 500m de chute (le diamètre des roues est de 2,4m).
- Le site en construction des TROIS GORGES en Chine sera équipé de 14 turbines de 710 MW (852 MW en pointe) sous 80 m de chute ; le débit maximal d'un groupe atteint la valeur de 1065 m<sup>3</sup>/s et le rendement la valeur de 96,26 % (le diamètre des roues est de 9,8 m).

**L'HYDROELECTRICITE EN EUROPE.**

Un livre blanc « *Energie pour l'avenir : les énergies renouvelables* » fait le point sur la situation actuelle et fixe des objectifs pour 2010. (voir figure 1)

En 1995 les énergies renouvelables représentent dans l'Union Européenne 6 % de la consommation. Le livre blanc fixe un objectif de 12 %. L'énergie hydraulique a fourni, en 1995, 307 TWh dont 37 TWh pour la Petite Hydraulique. La puissance installée est de 92 GW dont 9,3 GW pour la PH (puissance inférieure à 10 MW). L'augmentation possible de puissance en Grande Hydraulique est de 8,5 GW, car la plupart des grands sites exploitables sont équipés ; les sites potentiels posent trop de problème vis à vis de l'environnement. L'augmentation en PH prévue est de 4,5GW soit une progression de 300 MW par an qui semble réaliste au vu de l'augmentation de 240MW par an entre 1985 et 1995.

**Figure 1: Production en 1995 à partir de sources d'énergies renouvelables.**



**LA PETITE HYDROELECTRICITE EN FRANCE.**

En France les petits producteurs (environ 1500) fournissent 3,5 TWH, achetés en 1995 au prix moyen de 0,329 F le kWh. De nombreux sites potentiels ne sont pas encore exploités ; pourtant la PH ne connaît plus de développement en France pour diverses raisons qui sont :

- les sites les plus rentables sont déjà exploités;
- un certain nombre de fédérations de pêche et d'associations de défense de l'environnement s'opposent aux nouvelles créations;
- un certain nombre de cours d'eau ne peuvent être équipés car ils sont classés par décret.

A l'heure actuelle, en France, la relance de la maîtrise de l'énergie se traduit par des aides concernant :

- l'aide à la réhabilitation de barrages existants ;
- l'optimisation de l'existant;
- la labellisation environnementale.

L'ADEME avec un certain nombre de partenaires a effectué des études concernant :

- la rédaction d'un guide d'intégration des Petites Centrales Hydrauliques dans l'environnement ;
- le suivi expérimental hydrologique et hydrobiologique de PCH pour différents débits ;
- l'étude du peuplement piscicole sur les sites de PCH ;
- la rédaction d'un guide de recommandations concernant le bruit des PCH;
- étude de l'impact des lubrifiants sur les rivières.

Le droit d'exploiter un PCH nécessite une autorisation délivrée par l'Etat ; ces autorisations furent dans de nombreux cas renouvelées en 1996 ; la durée d'autorisation étant en général fixée à trente ans actuellement contre soixante-quinze auparavant.

Le règlement d'eau lié à une autorisation fixe les contraintes pour l'exploitant ; on peut citer :

- le débit réservé qui varie suivant les sites de 10 % à 40% (c'est le débit minimum exprimé en % du débit annuel moyen appelé module du cours d'eau, qui doit transiter dans la portion court-circuitée pendant l'exploitation de la turbine) ;
- le type de passe à poissons ainsi que les dispositifs de dévalaison à mettre en œuvre ;
- le type de passe à canoë kayak pour certaines rivières ;
- le niveau NGF du barrage, les variations de niveau du plan d'eau en fonctionnement normal et les dispositifs d'évacuation en cas de crues;
- l'espacement des grilles et les moyens d'évacuation des déchets, qui dans certains cas doivent être éliminés ; dans d'autres cas ils peuvent être rejetés en aval de la centrale;
- les modalités de raccordement au réseau EDF. Ces modalités sont fixées par un arrêté du 14 avril 1995 ( JO du 2 mai 1995 ) relatif aux conditions techniques de raccordement au réseau public des installations de production autonome d'énergie électrique.

## ANNEXE DES CONDITIONS TECHNIQUES DE RACCORDEMENT AU RESEAU PUBLIC.

Les conditions techniques de raccordement au réseau public des installations de production autonome d'énergie électrique de moins de 1 MW concernent :

- 1/ les intensité maximale et impédance des lignes électriques ;
- 2/ les modifications de la tension du réseau du fait des installations de production (fluctuations lentes) ;
- 3/ la vérification du fonctionnement de la télécommande 175 Hz ;
- 4/ le circuit bouchon passif à 175 Hz ;
- 5/ les harmoniques et déséquilibres ;
- 6/ la puissance réactive ;
- 7/ la protection de découplage ;
- 8/ la mise à la terre des masses et des neutres ;
- 9/ les couplages et variations de charge ;
- 10/ la transmission des ordres EJP ;
- 11/ les comptages.

**La suite de cet article va plus particulièrement traiter des protections de découplages.**

Le type de protection est imposé par l'annexe des conditions techniques de raccordement au réseau public. Le type de protection est adapté à l'installation du producteur et au réseau de raccordement.

### PROTECTION DE DECOUPLAGE.

EDF est tenue d'acheter la production des producteurs autonomes dans la mesure où ils ne perturbent pas le bon fonctionnement de la distribution ; l'obligation d'achat s'entend sous réserve que les producteurs prennent toutes les dispositions utiles, s'il y a lieu, en vue d'aménager leurs installations de façon à n'apporter aucune perturbation dans le fonctionnement du réseau.

#### 1/Installations concernées :

- a/ installations consacrées uniquement à la production d'énergie pour la vente à EDF ;
- b/ installations consommatrices qui comportent une production avec des excédents qui sont vendus à EDF ;
- c/ installations identiques à b/ mais qui restent toujours consommatrices ;
- d/ installation consommatrice avec groupe de secours pouvant être utilisé pour écrêter les pointes de charge (fonctionnement en parallèle pendant 10 s max.) ;
- e/ installations avec groupe de secours n'alimentant qu'une partie de l'installation ; une liaison intempestive entre les deux réseaux pourrait entraîner un maintien de la tension ;
- f/ installations comportant des moteurs asynchrones ou synchrones accouplés à une autre source mécanique d'énergie (volant d'inertie).

Les installations a/, b/, c/, sont classées comme "production autonome" ; les installations b/, c/, sont aussi classées en "auto-production".

#### 2/ Nécessité d'une protection dans les cas de défauts et de coupures sur le réseau EDF.

L'étude des différents cas de défauts et des différentes coupures permettra d'effectuer le choix du type de protection.

##### 2.1/ Défauts sur les canalisations MT du départ.

Les défauts éliminés sans qu'il y ait eu déclenchement du disjoncteur de départ du poste EDF, ne nécessitent pas d'interruption de la mise en parallèle de la source autonome avec le réseau ; ce sont :

- les défauts auto-extincteur ;
- les défauts monophasés éliminés par un disjoncteur shunt (mise à la terre momentanée de la phase en défaut) ;
- les défauts dans un poste client éliminés par la protection client.

Si un défaut entraîne le déclenchement du disjoncteur de départ, le maintien de l'alimentation de la canalisation en défaut par la source autonome doit être éliminé rapidement pour éviter les risques suivants :

- risques pour la sécurité des matériels et des personnes ; si des réenclenchements automatiques sont effectués, les arcs fugitifs de défaut risquent de ne pas subir une auto-extinction ; la non-extinction de l'arc peut provoquer un deuxième déclenchement, suivi d'un manque de tension d'au moins 15 secondes, qui peut être gênant pour les autres clients ;
- possibilité au réenclenchement du disjoncteur de renvoyer la tension sur une source autonome avec un déphasage, pouvant aller jusqu'à une opposition de phase « faux-couplage » ; la surintensité due au faux-couplage peut provoquer des contraintes trop importantes sur les matériels.

##### 2.2/ Passage en réseau séparé sans défaut.

Le passage en réseau séparé résulte de l'ouverture volontaire du disjoncteur de départ,

soit automatique, pour :

- une recherche de terre résistante
- un délestage fréquentométrique

soit manuelle.

On se trouve aussi dans la situation de réseau séparé, dans le cas d'un défaut MT avec arc, si celui-ci s'éteint dès le déclenchement du disjoncteur source lors du passage en neutre isolé (seul le neutre du poste source est relié à la terre).

Dans ces différents cas, la source autonome fonctionne en réseau autonome avec les autres clients ; elle doit être découplée quand la fréquence ou la tension sont anormales. Si les conditions de tension et de fréquence restent normales, il existe un risque de faux-couplage lors de la remise sous tension.

##### 2.3/ Défauts en aval d'un autre départ MT ou sur le réseau HT ou THT.

Lorsqu'il se produit un défaut monophasé en aval d'un autre départ ou sur le réseau HT ou THT, la source autonome peut rester couplée. Il en est de même pour un défaut triphasé s'il ne perturbe pas ou peu les tensions au niveau du jeu de barres MT.

Les défauts biphasés ou triphasés proches du jeu de barres peuvent provoquer une baisse importante de tension qui peut avoir des effets analogues à une coupure de tension (risque de dé-synchronisation des sources autonomes). Le risque de faux-couplage est probable, si au moins une des tensions composées devient inférieure à 25 % de la tension nominale.

#### 2.4/ Relayage de présence tension sur le départ EDF.

Dans le cas d'alimentation MT comportant un système de réenclenchement rapide, EDF peut imposer l'installation de relais de présence tension au poste source pour éviter les réenclenchements avant le découplage des sources autonomes. Le client, s'il estime que le risque de faux-couplage peut être néfaste à son installation, peut demander lui aussi l'installation de relais «présence tension».

### 3/ Détermination du type de la protection de découplage.

#### 3.1/ Critères de détermination.

La constitution de la protection de découplage dépend, d'une part, des caractéristiques du réseau, essentiellement celles du départ, et, d'autre part, des caractéristiques de l'installation de la source autonome. Ces caractéristiques interviennent dans la détermination du type de protection, ainsi que dans l'installation des dispositifs annexes (relais de « présence tension »).

#### 3.2/ Caractéristiques du réseau.

##### 3.1.1/ Ré enclenchement automatiques.

Les départs peuvent être classés en 3 groupes :

a/ Départs avec réenclenchement rapide (RR) au bout de 0.3s, et réenclenchement lent ensuite (15s), pour élimination des défauts fugitifs.

Ce sont :

- les départs dits «aériens», où les câbles sont limités à de courtes longueurs.
- les départs «mixtes», comportant à la fois des lignes aériennes et des câbles souterrains ou torsadés, en pratique à partir de quelques kilomètres de câbles.

b/ Les départs avec réenclenchement lent (RL) au bout de 15s. Ce sont :

- les départs «mixtes», comportant une faible longueur de ligne aérienne ;
- les départs «souterrains», susceptibles de réalimenter en secours une ligne aérienne, le réenclenchement étant nécessaire pour la recherche de terre résistante.

c/ Les départs «souterrains» ne comportant que des câbles et ne nécessitant normalement pas de réenclenchement. (Un défaut sur un câble est en général un défaut définitif, qui nécessite une recherche et une intervention pour être éliminé). Il n'est pas nécessaire que le déclenchement soit aussi rapide dans les cas b/ et c/ que dans le cas a/.

##### 3.1.2/ Courant résiduel capacitif de départ (Irc).

Dès l'ouverture du disjoncteur de départ, il y a fonctionnement en réseau à neutre isolé.

Si la source autonome maintient une tension normale, le courant de défaut franc à la terre est le courant résiduel capacitif du départ.

La résistance du défaut de terre modifie très peu le courant de défaut, sauf si Irc est très élevé, comme le montrent ces deux exemples :

- pour une ligne aérienne de 150 km en 20kV, le courant Irc vaut : 8 A, le courant de défaut vaut : 8 A pour  $R = 200 \Omega$ , 7 A pour  $R = 800 \Omega$  et 5.3 A pour  $R = 1600 \Omega$ .

- pour un départ mixte avec un câble 3x150 mm<sup>2</sup> de 16 km, le courant Irc vaut 80 A, le courant de défaut vaut 47 A pour  $R = 800 \Omega$  et 7 A pour  $R = 1600 \Omega$ .

Si Irc est inférieur à 15 A, les défauts fugitifs ont toutes chances de disparaître, car l'arc est auto-extincteur.

##### 3.1.3/ Puissance active minimale consommée sur le départ.

La puissance active minimale consommée sur le départ en l'absence de la source autonome permet de choisir le type de protection ; on considère que le risque de non-découplage (fonctionnement en réseau autonome) est négligeable, si la puissance de la source ou des sources autonomes raccordées sur le départ est inférieure à la moitié de la puissance active minimale consommée sur le départ.

#### 3.3/ Caractéristiques de l'installation de la source autonome.

Les générateurs constituant une source autonome peuvent être à caractère permanent ou occasionnel.

Les alternateurs, du fait de leurs excitations, sont considérés comme des générateurs de tension permanents.

Les moteurs asynchrones entraînés par une turbine hydraulique, utilisés en génératrice hypersynchrone, ou les moteurs entraînant de forte inertie, sont aussi considérés comme des générateurs permanents, car ils peuvent rester auto-amorcés sur des capacités. Ces capacités sont soit les capacités pour relever le facteur de puissance (chez le client ou sur le réseau), soit les capacités des lignes et câbles d'alimentation. (un câble de 3x150 mm<sup>2</sup> métallisé de longueur 1 km fournit 60 kVAr sous 20 kV).

Les moteurs asynchrones ou les moteurs synchrones qui n'entraînent pas des charges à forte inertie sont considérés comme ne présentant pas de danger.

#### 3.4/ Choix des protections.

Le tableau suivant récapitule tous les cas envisageables.

Les protections du type 1.1 à 1.5 se caractérisent par un relais de tension homopolaire sur la MT ce qui impose la présence de trois transformateurs de tension.

Les protections de type 2.1 et 2.2, dites simplifiées, sont raccordées en BT.

Les protections de types 3.1 à 3.4 se caractérisent par un relais à retour de puissance.

Tableau de choix des protections.

Source autonome		Raccordement de l'installation en	Départ MT EDF			
autres caractéristiques		Sn	Aérien ou mixte	Mixte exception- nellement souterrain avec RL seulement	Souterrain sans réenclen- chement	
source permanente	alternateur	> 3MVA	MT	<u>1,1</u> ;[1,2];[1,3];1,4	<u>1,1</u> ;[1,2];[1,5];1,4	<u>1,2</u> ; 1,5 ; 1,4
		<3MVA	MT	<u>1,1</u> ;[1,2];[1,3]	<u>1,1</u> ;[1,2];[1,5]	<u>1,2</u> ; 1,5
	génératrice asynchrone	>100kVA	MT	<u>1,1</u> ;[1,2];[1,3]	<u>1,1</u> ;[1,2];[1,5]	<u>1,2</u> ; 1,5
		<100kVA	MT	<u>2,1</u> ; 1,1 ; [1,2]	<u>2,1</u> ; 1,1 ; [1,2]	<u>2,1</u> ; 1,2
		<100kva>9kV	BT	<u>2,1</u> sinon raccordement MT		
<9 kVA	BT	2,2				
Groupe de secours sans coupure avec parallèle de 10s			MT	1,1	[3,1 ; 1,1	
Groupe de secours avec reprise partielle et interdiction de parallèle non garantie			MT ou BT	3,2		
source occasionnelle	moteur + volant d'inertie		MT ou BT	3,3		
	moteur asynchrone + turbine		BT	3,4		

la protection minimale est soulignée

[ ] protection soumise à des restrictions d'emploi

Dans le cas des sources autonomes, les protections les plus souvent rencontrées sont celles du type 1,X. Le détail de la composition des différentes protections, ainsi que leurs avantages et leurs défauts sont résumés dans le tableau en annexe.

#### 4/ Détection des défauts

##### 4.1/ Exemple de détection des défauts MT à la terre.

###### 4.1.1/ Réglage des relais de tension homopolaire.

Une installation autonome ne doit pas comporter de mise à la terre du neutre MT, donc les défauts de terre externes à l'installation ne peuvent pas être détectés par un relais à maximum de courant résiduel (celui-ci ne détecterait que le courant résiduel capacitif de l'installation).

La détection des défauts de terre s'effectue par un relais de tension homopolaire raccordé sur la moyenne tension. Ce relais, à lui seul, impose la présence d'une cellule transformateur de potentiel, même si le comptage est effectué en BT ; de ce fait tous les relais de protection effectueront leurs mesures sur la sortie des transformateurs de potentiel.

Dans le cas d'un comptage HT, les transformateurs de potentiel peuvent être communs, si leurs puissances apparentes sont suffisantes.

###### 4.1.2/ Fonctionnement avec neutre MT à la terre en cas de défaut (le disjoncteur de départ est fermé).

Tant que le disjoncteur de départ est fermé, le neutre est relié au poste source à la terre par une résistance ou par une bobine de point neutre.

On notera  $\bar{Z}_n$  l'impédance neutre terre.

La tension homopolaire  $\bar{V}_h$  qui apparaît en cas de défaut résistant  $R$  vaut

$$\bar{V}_h = \frac{-\bar{V}_n}{1 + R\left(\frac{1}{\bar{Z}_n} + j3C\omega\right)}$$

$C$  est la capacité homopolaire totale du réseau,

$\bar{V}_n$  est la tension simple du réseau.

Si l'on néglige l'impédance de la capacité homopolaire devant  $\bar{Z}_n$ , la formule devient en module :

si  $\bar{Z}_n$  est une résistance pure  $R_n$ , alors

$$V_h = \frac{V_n}{1 + \frac{R}{R_n}}$$

si  $\bar{Z}_n$  est une réactance pure  $X_n$ , alors

$$V_h = \frac{V_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{R}{X_n}\right)^2}}$$

Deux cas se présentent :

- soit le défaut est peu résistant, dans ce cas la tension homopolaire est importante ; le relais de tension homopolaire détecte le défaut ; si son action est instantanée, il provoque le découplage de la source autonome en même temps que le disjoncteur départ s'ouvre ;

- soit le défaut est plus résistant, et le relais homopolaire ne déclenche pas ; il ne détectera le défaut que dans le cas suivant.

4.1.3/ Fonctionnement avec neutre MT isolé.

Si le disjoncteur de départ est ouvert, l'impédance  $\bar{Z}_m$  devient infinie, la capacité homopolaire du réseau devient celle du départ concerné, elle sera notée Cd ( $Cd < C$ ).

La tension homopolaire en module devient :

$$V_h = \frac{V_n}{\sqrt{1 + (3CdR\omega)^2}}$$

Comme la capacité homopolaire est faible, de l'ordre de  $5.10^{-9}$  F/km pour une ligne aérienne, la tension homopolaire est proche de  $V_n$ .

La sensibilité du relais de tension homopolaire est fonction du courant de réglage du relais de détection de terre résistante sur le départ. En général, le seuil de réglage du relais de tension homopolaire est de 30% de  $V_n$ .

4.2/ Exemple de détection des défauts polyphasés.

Principe de détection.

Les défauts peuvent être détectés :

- soit par le courant de défaut fourni par la source autonome
- soit par la chute de tension au point de raccordement

Comme pour un défaut de terre on distingue deux modes de fonctionnement successifs.

Disjoncteur de départ fermé, dans ce cas le défaut est alimenté par le poste source qui présente une faible impédance et par la source autonome qui a une impédance plus élevée. Si le défaut est voisin du poste source, il est possible que le défaut ne soit pas détectable au point de raccordement de la source autonome (courant de défaut peu élevé et chute de tension négligeable).

Disjoncteur de départ ouvert, la source autonome alimente seul le départ considéré.

La réactance réduite des générateurs est élevée (environ 30% pour la réactance directe et 20% pour la réactance inverse pour un alternateur hydraulique). D'autre part, il faut ajouter la réactance du transformateur, pour le calcul du courant de défaut ; le rapport entre le courant de défaut et le courant nominal est alors faible, de l'ordre de 2 à 3.

Ce faible rapport pose des problèmes dans le cas où le producteur possède plusieurs générateurs (le courant de court-circuit d'un générateur peut être inférieur au courant nominal de l'ensemble des générateurs).

Pour des installations également consommatrices, le courant de court-circuit peut être inférieur au courant calculé avec la puissance souscrite.

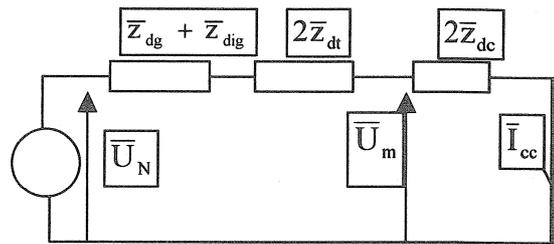
La détection d'une surintensité pose donc trop de problèmes pour être envisagée.

La solution est donc de s'intéresser à la chute de tension, car la chute de tension due aux impédances de la source autonome au point de raccordement en cas de court-circuit est importante (l'impédance de la canalisation d'alimentation est plus faible que celle de la source autonome).

4.3/ Exemple de calcul préconisé par EDF pour vérifier le réglage du relais à minimum de tension.

Calcul du courant de court-circuit entre phases, cas d'une centrale de 2 000 kVA alimentée par une ligne aérienne 20 kV de 75 km en Almélec de 54,6 mm<sup>2</sup>.

Le schéma suivant représente la boucle en court-circuit



Calcul de  $\bar{z}_{dg}$  impédance (réactance) directe du

$$\text{générateur } \bar{z}_{dg} = j \frac{30}{100} \frac{(2.10^4)^2}{(2.10^6)^2} = 60j$$

$$\bar{z}_{di} = 40j$$

$\bar{z}_{dt} = 14j$  (l'impédance réduite du transformateur est prise comme valant 7%)

Pour la canalisation  $r_c = 0,6 \Omega / \text{km}$ ,  $x_c = 0,4 \Omega / \text{km}$

$$\text{Soit } \bar{z}_{dc} = 45 + 30j$$

L'impédance totale du circuit vaut  $\bar{Z}_t = 90 + 188j$

$$\text{Soit en module } z_t = 208 \Omega$$

Le module de l'impédance de la canalisation vaut  $2z_c = 108 \Omega$

Calcul de la tension  $\bar{U}_m$ , c'est la tension au point de mesure de la source autonome

Le module de la tension  $U_m$  en pourcentage de  $U_n$  vaut :

$$\frac{108}{208} = 52 \%$$

Cet exemple montre que dans la majorité des cas (la puissance de la source est souvent plus faible et la longueur de la canalisation est en général plus courte) la tension chute à une valeur inférieure au seuil de détection des relais à minimum de tension qui sont réglés à 85%.

De façon à assurer un déclenchement certain en cas de court-circuit, le pourcentage de la tension  $U_m$  par rapport à  $U_n$  ne doit pas dépasser 85% de la tension de réglage des relais, soit 72% de la tension  $U_n$ .

Un calcul identique pour une source autonome de 200 kVA alimentée par une ligne aérienne 20 kV de 50 km en Almélec de 54,6 mm<sup>2</sup> donne une tension de défaut au point de raccordement de 6%.

Types	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
Utilisation	Tous départs (utilisation exceptionnelle): Sn installation <100kVA) (11)	Tous départs (utilisation exceptionnelle): Sn installation < 100kVA) (11)	Départs avec R.R	Tous départs (alternateurs avec Sn > à 3MVA)	Départ avec R.L ou sans réenclenchement automatique
Restriction	Aucune	Peut ne pas être utilisable s'il s'agit d'un départ avec RR à caractère industriel ne déclenche pas sur les coups de disjoncteur shunt (4)	Non utilisable si le départ est à caractère industriel	Pas de restriction autre que les installations importantes du fait des contraintes de maintenance au poste source	
Protection					
Défaut à la terre	Relais 1 Rel. à max. de tension homopololaire	Réglage aérien mixte souterrain 30% (1)	Action temporisée 1 à 1,5s	Relais 1 Rel. à max. de tension homopololaire	Réglage aérien mixte souterrain in 30%
Défauts polyphasés	3 Rel. à minimum de tension	1 Rel. à maximum de tension homopololaire	3 Rel. à minimum de tension	3 Rel. à minimum de tension	3 Rel. à minimum de tension
Marche anormale en réseau séparé sans défaut	1 Rel. à max de tension 1 Rel. mini fréq 1 Rel à maxi fréq	1 Rel. à max de tension 1 Rel. mini fréq 1 Rel à maxi fréq	1 Rel. à max de U 1 Rel. mini fréq 1 Rel à maxi fréq	1 Rel. à max de tension 1 Rel. mini fréq 1 Rel à maxi fréq (8a)	1 Rel. à max de tension 1 Rel. mini fréq 1 Rel à maxi fréq (14)
Suppression des faux couplages suite à baisse importante de tension			Plus 2 relais à mini de tension 0,25 Um à action instantanée à l'initiative du client ou du producteur	3 relais mini de tension à 0,25 Um à action instantanée à l'initiative du producteur ou du client,	3 relais mini de tension à 0,25 Um à action instantanée à l'initiative du producteur ou du client,
Commutateur R.S.E		A installer si départ aérien ou mixte (la nécessité de manoeuvre sera fonction du caractère du réseau (7))	A installer (la nécessité de manoeuvre sera fonction des caractéristiques du réseau (7))	(9b)	A installer si départ aérien ou mixte : la nécessité de manoeuvre sera fonction des caractéristiques du réseau (7)
Relayage présence tension	Non exigé par EDF: possible dans la plupart de cas à la demande du client ou du producteur (4) (15)	Exigé par EDF si départ avec RR : possible si RL seulement à la demande du producteur ou du client avec alors réglage à 0,2Vn	Exigé par EDF : Réglage à 0,2 Vn	(9c)	Non exigé par EDF: possible à la demande du producteur ou du client avec réglage à 0,2 Vn
Risques de faux couplages	Si pas de relayage de présence de tension (10)	Si pas de relayage de présence de tension (10)	(10)	(10)	Si R.L et pas de blocage
Découplages injustifiés	Nombreux : - défauts à la terre peu résistants - fonctionnement disjoncteur shunt - Défauts polyphasés avec 0,25Um < Um < 0,85 Um	Nombre limité (-60% par rapport à 1.1) - quelques cas de recherche de terre résistante - défauts polyphasés avec 0,25 Um < Um < 0,85 Um	Très rares: - quelques cas de recherche de défauts résistants - baisse générale de la fréquence en dessous de 49,5 Hz	Très rares : quelques cas de recherche de terre résistante éventuellement	Très rares : quelques cas de recherche de terre résistante éventuellement

Alimentation circuit mesures des relais (5)		Vh : 3 transformateurs de tension en amont de la protection générale M.T		U et F: entre phases sur 3 transformateurs de tension en amont de la protection générale M.T	
Alimentation auxiliaire des relais		En tension alternative entre phase et neutre sur la basse tension d'un transformateur côté réseau EDF par rapport à l'appareil de découplage - Alimentation en courant continu		Alimentation indépendante en courant continu	
Découplage à manque de U		Protection plus performante que 1.1 bien que ne nécessitant pas obligatoirement une alimentation indépendante en courant continu. Impose le commutateur R.S.E. Si le départ n'est pas équipé d'un R.R; il y a lieu d'utiliser une protection 1.5 qui apporte les mêmes avantages sans le réglage à 49,5Hz		Protection la plus performante; aucune disposition lors des TST. Nécessite une liaison PTT fiable avec contrôle de la liaison aux deux extrémités. La coupure ou la suppression de la liaison PTT doit donner une alarme et supprimer les temporisations.	
Commentaires :		Protection minimale exigée par EDF Aucune disposition à prendre pour les travaux sous tension (TST)		Protection plus performante que 1.2 mais nécessite une alimentation courant continu. Impose un commutateur R.S.E. Si le départ n'est pas équipé d'un R.R; il y a lieu d'utiliser une protection 1.5 qui apporte les mêmes avantages sans le réglage à 49,5Hz	
RR	Réenclenchement rapide				
RL	Réenclenchement lent				
TST	Travaux sous tension en MT				
RSE	Régime spéciale d'exploitation				
Um	Tension moyenne entre phase				
MT	HTB				

(1) Dans le cas de départ aérien ou mixte, le réglage du relais de tension homopolaire est effectué en fonction du courant résiduel capacitif de départ et du réglage du détecteur de terre résistante, afin de détecter en réseau à neutre isolé les mêmes défauts que le poste source.

(2) Les relais à minimum de tension entre phases, servent à la fois à détecter les marches en réseau séparé et à détecter les défauts triphasés et biphasés sur le départ, au moins après passage en réseau séparé.

(3) Action instantanée : signifie que le temps de réponse est limité à celui du relais de mesure et de l'appareil de découplage (100ms pour un disjoncteur MT et 50ms pour un disjoncteur et ou contacteur BT).

(4) Dans le cas d'un départ dont une proportion importante de la charge est constituée par des moteurs, la tension peut encore être supérieure à 0.2 Un, 0.25s après l'ouverture du disjoncteur. Cette situation n'est pas acceptable, car elle augmente le temps de coupure des autres clients.

La protection de type 1.2 pourra être retenue dans ce cas, s'il est possible d'installer un relais de présence tension réglé à 0.6 Un.

(5) Si le comptage est effectué en MT, les transformateurs de tensions TT peuvent être communs à condition de respecter leurs puissances.

(6) Le relais de temporisation peut être commun aux différents relais de mesure lorsqu'il est prévu un commutateur R.S.E supprimant la temporisation. Le temps total de la tempo des relais de tension entre phases doit être supérieur de 0.5s à la temporisation la plus élevée des disjoncteurs de départ du poste source pour supprimer les risques de découplage en cas de défaut en aval de ceux-ci.

(7) Les conditions de manœuvres sont précisées par EDF.

(8) a/ Dans le cas de la protection 1.3, le relais de fréquence doit avoir des performances particulières, car son rôle est de détecter dès que possible le passage en réseau séparé, qu'il y ait ou non un défaut sur le départ : plage de fréquence 49.5Hz -50.5 Hz tension minimale de fonctionnement 0.2 Un, temps de réponse inférieur à 175 ms. Il est complété par un relais à minimum de tension branché sur les mêmes phases, réglé à 0.25 Un

b/ Le relais de fréquence réglé à 49.5Hz a pour inconvénient de déclencher en cas de baisse de fréquence du réseau du à une insuffisance de production.

(9) a/ L'asservissement nécessite une liaison PTT fiable avec, à chaque extrémité, un dispositif contrôlant en permanence la qualité de la liaison.

b/ La rupture de la liaison PTT ou sa mise hors service de l'asservissement doit donner une alarme et supprimer la temporisation de la protection de secours. De ce fait aucune disposition n'est à prendre lors des T.S.T.

c/ La rupture de la liaison PTT ou sa mise hors service de l'asservissement côté poste source, doit donner une alarme et mettre hors service le réenclenchement automatique ou par télécommande.

(10) Des dispositions supplémentaires doivent être prises au poste source, pour éviter les possibilités de faux couplages, lors d'une permutation automatique de transformateur au niveau H.T./MT ou THT/H.T. suite à avarie.

(11) Possibilité de raccordement en B.T.

(12)a/Dans les installations productrices et consommatrices, l'appareil de découplage sépare souvent les installations en 2 parties: celles restant raccordées à EDF et celles réalimentées par la source autonome.

b/Dans le cas d'alternateur (s) de secours ou de remplacement, dont le temps de marche en parallèle est limité à 10 s ou au temps de passage des heures de pointe, l'action de la protection de découplage doit être inhibée par un circuit fonctionnant à émission de tension lorsqu'aucun groupe n'est en service.

(13) L'action instantanée doit toute fois avoir un temps de réponse de l'ordre de 50 à 80 ms afin d'être insensible aux surtensions transitoires.

(14) dans le cas d'une installation d'auto-production, le client peut demander, afin d'améliorer la reprise de ces charges en îlot sur le ou les groupes, que le réglage de la fréquence soit plus proche de 50 Hz. Il peut utiliser un relais instantané de fréquence réglé à 49.5 et 50.5Hz.

(15) La présence de génératrices asynchrones de puissance inférieure à 100 kVA ne justifie pas l'installation d'un relaying de présence tension.

Les types de relais, les marques et les réglages sont imposés par EDF.

Selon le type de protection :

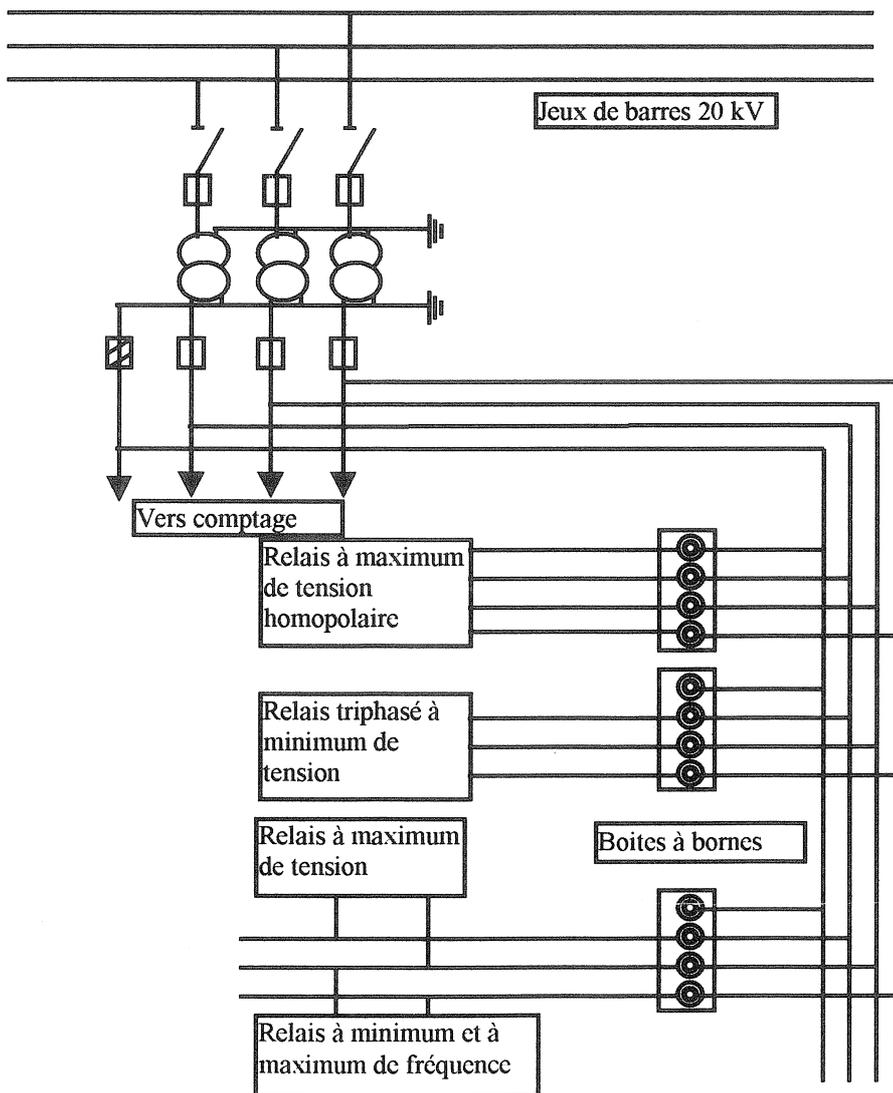
Si certaines protections sont à déclenchements temporisés, un commutateur de régime spécial d'exploitation RSE, à deux positions Normal et TST (travaux sous tension), permet de supprimer les temporisations et de rendre le déclenchement instantané ; ce commutateur est manœuvré par EDF.

**Bibliographie :**

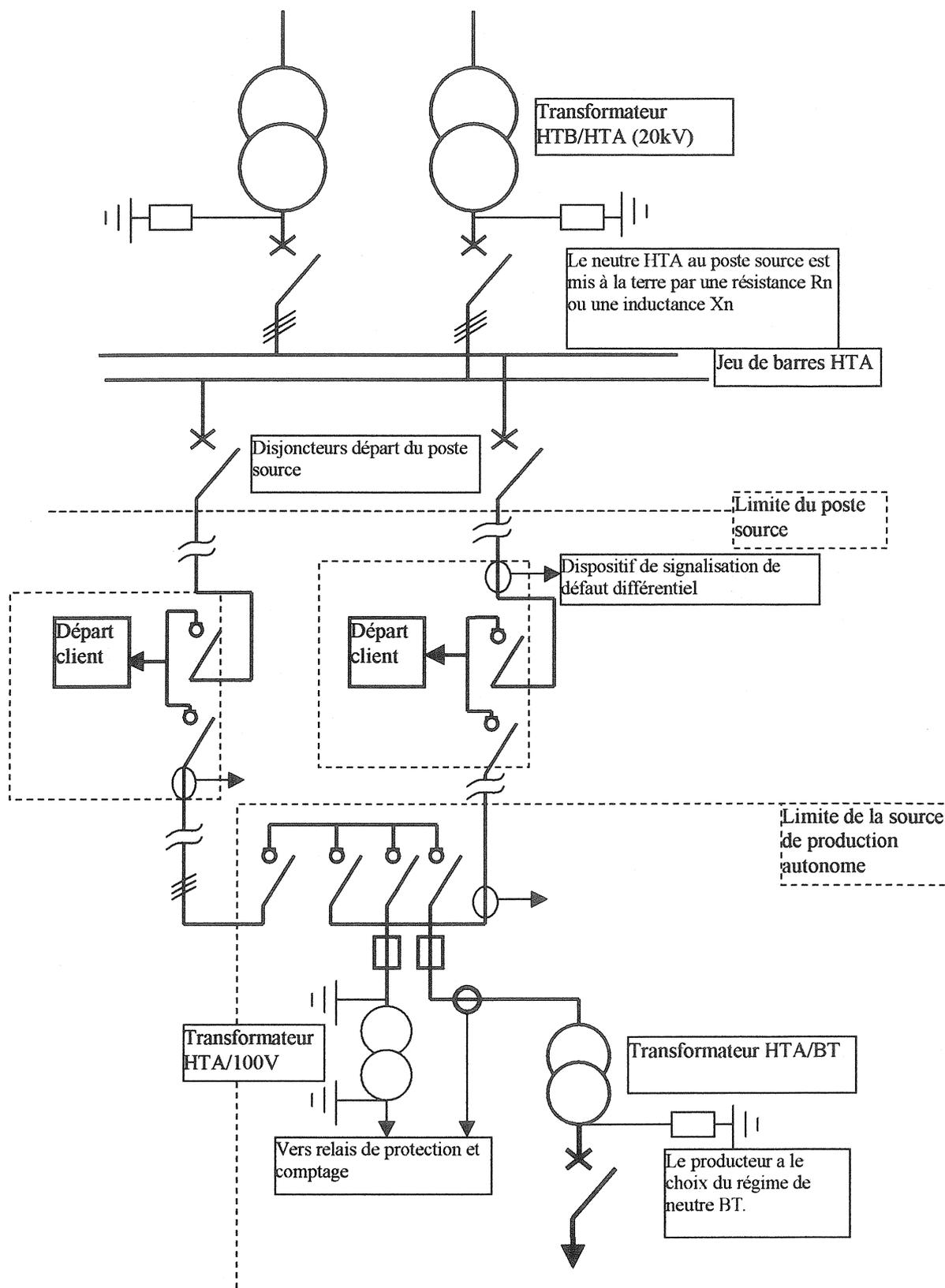
- Journal officiel du 2 mai 1995.
- La Houille Blanche N° 8 1998.
- Turbines hydraulique Lucien VIVIER.
- Guide technique de la distribution :Protection des réseaux (EDF)

**Exemple de branchement des relais de découplage.**

Les boites à bornes sont utilisée par EDF pour effectuer le réglage et les essais des relais de protection, elles permettent d'isoler les relais du circuit de mesure et d'injecter des tensions perturbées.



## Schéma de distribution HTA en coupure d'artères



Le dispositif de signalisation de défaut différentiel alimente un témoin placé d'une façon visible à l'extérieur du poste client. Il permet aux agents d'exploitation de connaître l'endroit où se trouve un défaut et d'isoler la partie en défaut. Rappel en fonctionnement normal la boucle est ouverte en un point.

Nota : sur ce schéma n'apparaissent pas les sectionneurs de mise à la terre, les disjoncteurs shunt et les dispositifs de réenclenchement si ils existent au poste source.

# UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE DANS LA PRODUCTION DE L'ELECTRICITE

A. TOUNZI

Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille L2EP

USTL - IUT A, Bât P2, 59655 Villeneuve d'Ascq, FRANCE

Tel: 03-20-43-49-06, Fax: 03-20-43-69-67, E.mail: mounaim.tounzi@univ-lille1.fr

<http://www.univ-lille1.fr/l2ep/>

*Résumé. En raison des progrès techniques effectués ces dernières années, l'utilisation de l'énergie éolienne pour la production de l'énergie électrique connaît un certain essor.*

*Dans cette communication, nous faisons un point sur la partie électrotechnique des centrales éoliennes. Après un bref historique, nous présentons d'abord quelques chiffres sur le potentiel éolien ainsi que sur la puissance des centrales en activité. Ensuite, nous abordons succinctement le principe de fonctionnement d'une centrale éolienne. Dans une seconde partie, nous faisons le descriptif de différentes solutions électrotechniques utilisées ou susceptibles de l'être. Enfin, nous terminons par un aperçu de différentes stratégies de commande qui offrent de nouvelles perspectives en terme de réglage de l'énergie produite.*

*Le présent article a été présenté aux journées "Electrotechnique" du club EEA qui se sont déroulées les 28 et 29 Janvier 1999 au CNAM Paris.*

## 1 Introduction

L'idée d'utiliser la force du vent pour mouvoir un système est loin d'être récente. L'une des premières exploitations de l'énergie éolienne fût la navigation. Le vent soufflant dans une voile a permis de parcourir de grandes distances. Vinrent ensuite les moulins à vent qui servirent à moudre le grain ou à pomper de l'eau. Le principe était simple, la puissance du vent fait tourner l'hélice du moulin. Ce mouvement rotatif est transmis, par le biais de systèmes d'engrenages mécaniques à la meule qui se trouve en dessous. Dans le cas du pompage de l'eau, le mouvement des pales est transmis directement à un piston qui, par un mouvement de va et vient dans le puits, permet de faire remonter l'eau.

Si les moulins à vent ne remplissent plus qu'une fonction de patrimoine touristique, le principe de pompage de l'eau est toujours usité avec des systèmes à multipales moins massifs et plus proches des structures actuelles. On estime d'ailleurs à 1 million le nombre des centrales éoliennes, destinées au pompage de l'eau, installées dans le monde. Elles sont principalement localisées aux Etats-Unis, Australie, Afrique du sud et Argentine [1].

L'utilisation de l'énergie éolienne pour la production de l'énergie électrique est née à la fin du 19<sup>ième</sup> siècle. Paul la Cour (1846-1908), créa la première centrale éolienne<sup>1</sup> en 1891 [5]. Il a construit son propre tunnel à vent pour expérimenter son installation. L'utilisation des éoliennes se développa tout d'abord dans les pays froids, elles furent utilisées dans la production d'électricité en Arctique et Antarctique. L'explorateur danois Fridjiof Nansen a utilisé, pour son expédition polaire entre 1893 et 1896, une éolienne pour produire de l'électricité lorsque son bateau se trouvait pris dans la banquise. Cette "centrale" avait l'allure d'un moulin à vent traditionnel,

principalement en bois, avec 4 ailes entoilées [3]. D'autres explorateurs, comme l'anglais R. F. Scott ou l'allemand E. Von Drygalski, ont adopté la même formule au début du vingtième siècle dans leur exploration des côtes antarctiques. L'utilisation des éoliennes ne resta pas cloîtrée dans le domaine des expéditions. En effet, des centrales de production furent érigées et, en 1918, 120 unités de production, d'une puissance unitaire de 20 à 35 kW, étaient installées et reliées au réseau électrique danois. Elles fournissaient une puissance de près de 3MW [5].

Depuis, beaucoup de progrès ont été apportés aux éoliennes. On est passé des moulins à vent massifs à des systèmes plus haut avec des mâts en treillis, puis avec l'augmentation de la puissance et donc du poids de la nacelle, à des mâts solides ou tubulaires en béton ou en acier. Du système à multipales, on est passé aux bipales puis aux tripales qui équipent pratiquement toutes les éoliennes actuelles. D'autres progrès, moins visibles, ont aussi été apportés, tant à la composition du mât et des pales qu'à la partie électrique et aux systèmes de commande.

Dans cette communication, nous allons, dans un premier paragraphe, discuter du potentiel éolien et des différentes puissances installées. Le second sera consacré à une présentation succincte de la constitution d'une éolienne et son principe de fonctionnement tant en réseau qu'en fonctionnement autonome.

Nous aborderons ensuite la partie génératrice de la centrale et nous ferons un descriptif des différentes machines électriques utilisées et celles qui sont au stade de recherches ou d'essais de prototypes.

Enfin, nous passerons en revue quelques unes des stratégies de commande électrique élaborées tant pour les éoliennes connectées au réseau que pour celles fonctionnant en autonome.

<sup>1</sup> Par la suite, nous désignerons une centrale éolienne par le terme éolienne.

## 2 Potentiel éolien et centrales installées

### 2-1 Potentiel éolien

Les vents sont constitués par des masses d'air en mouvement. La base de ce mouvement est principalement due à des différences de pression et de température entre les différentes régions de la planète. En effet, la surface non homogène de la terre est réchauffée inégalement par le rayonnement solaire. Cela crée alors des gradients de température et de pression suffisamment élevés pour que l'air se déplace sur de grandes distances. Nous avons alors ce qu'on appelle les vents planétaires (figure 1).

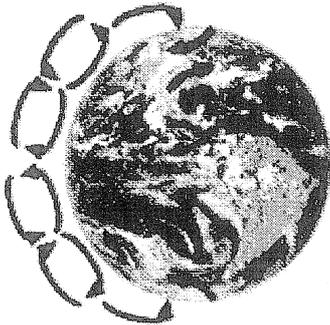


Fig 1: Vents planétaires [5]

A une moindre échelle, la différence de température et de pression entre la mer et la terre, ou encore entre sommets et vallées dans les reliefs montagneux, engendrent des vents plus locaux.

Pour qu'un site soit potentiellement exploitable, il faut tout naturellement qu'il soit venté. Cependant, ce terme ne veut pas dire que le site doit être le siège de très grands vents mais il faut que ces derniers aient au moins une vitesse moyenne de l'ordre de 5 à 7 m/s et surtout que la distribution des vitesses autour de cette moyenne soit la plus homogène possible.

En fonction de la vitesse du vent, il est possible de caractériser les différentes étapes de fonctionnement d'une éolienne (Tableau 1).

A partir du recensement des sites ventés, les ressources mondiales exploitables sont estimées à  $1.10^{15}$  kWh/an [8], ce qui est loin d'être négligeable par rapport à la consommation mondiale actuelle d'énergie qui est de l'ordre de  $120.10^{12}$  kWh/an. Il est à noter que l'estimation des ressources éoliennes mondiales est à prendre avec des réserves. Suivant les différentes sources, les valeurs avancées sont très disparates, et rares sont les

sources qui donnent les conditions dans lesquelles sont effectuées ces estimations. En effet, la puissance éolienne pouvant être captée dépend de la hauteur à laquelle se trouve la nacelle (la vitesse du vent est plus élevée en hauteur), du diamètre des pales, de la distance entre les différentes éoliennes installées etc.... D'autre part, si les estimations de la puissance pouvant être captée sur des sites terrestres sont précises du fait des différentes mesures de vitesses de vent effectuées, les ressources en mer (off-shore) sont encore mal appréciées étant donné que les cartes des vents maritimes sont, dans la plupart des cas, très approximatives. Une étude très détaillée du potentiel éolien français [7] aboutit à une estimation de l'énergie techniquement récupérable de  $70 \cdot 10^9$  kWh/an sur des sites terrestres et de  $477 \cdot 10^9$  kWh/an sur des sites en mer. La totalité de cette énergie représente 1,5 fois l'énergie électrique actuellement consommée en France. En prenant les conditions d'exploitation actuelles, le potentiel éolien français est estimé à  $50 \cdot 10^9$  kWh/an, soit 13% de la consommation.

### 2-2 Centrales éoliennes installées

Les premières éoliennes ont été conçues plus comme un défi technologique et innovateur que comme des centrales de production massive. Jusque dans les années 70, leur développement, à part l'exception danoise, resta marginal et visa essentiellement de petites unités de production décentralisées. Depuis le premier choc pétrolier, l'intérêt se porta sur toutes les possibilités de production de l'énergie électrique ne dépendant pas du pétrole, et entre autre sur l'éventualité des énergies renouvelables. Différentes études ont alors été effectuées sur l'utilisation de l'énergie solaire et éolienne et les premières installations de production massive virent le jour. Elles furent essentiellement réparties aux Etats-Unis et dans les pays scandinaves.

Depuis, avec la prise de conscience des problèmes de pollution planétaire et de l'effet de serre d'une part, et avec les différents progrès effectués dans le domaine de l'éolien d'autre part, l'intérêt pour cette filière de production de l'énergie électrique, ainsi que son exploitation, se sont accrus. Actuellement, la puissance éolienne exploitée en Europe dépasse celle installée aux Etats-Unis. Par ailleurs, des pays en voie de développement commencent à manifester leur intérêt pour ce secteur. Le tableau 2 donne les puissances installées fin 1996 et 1997 ainsi que le pourcentage d'évolution entre ces deux années.

Vitesse du vent (m/s)	Vitesse du vent (km/h)	Caractéristiques de fonctionnement
4,5	16,2	Vitesse d'amorçage
6	21,6	Vitesse moyenne minimale d'exploitation
8	28,8	Seuil idéal pour une installation rentable
15	54	Pleine production
25	90	Arrêt des petites centrales Réduction des capacités des grandes centrales
30	108	Arrêt des éoliennes

Tableau 1 : Caractéristiques de fonctionnement d'une éolienne en fonction de la vitesse des vents [6]

Pays	1996	1997	Croissance
Allemagne	1552	2002	29%
Danemark	835	1135	35.9%
Espagne	249	449	80.3%
Pays-Bas	299	349	16.7%
Royaume-Uni	273	333	22%
Suède	103	123	19.4%
Italie	70	110	57.1%
Grèce	29	69	137.9%
Irlande	10.6	50.6	377.4%
Portugal	19.1	29.1	52.4%
Finlande	7.2	12.2	69.4%
France	7	10	42.9%
Autres pays européens	41.7	88.7	112.7%
EUROPE	3496	4761	36.2%
Etats-Unis	1596	1646	3.1%
Inde	820	870	6.1%
Chine	79	170	126.6%
Reste du monde	114	224	104.2%
TOTAL	6105	7680	25.8%

Tableau 2 : Capacité installée (en MW) fin 1996 et 1997 [3]

Les statistiques données dans ce tableau sont, comme pour le cas des estimations éoliennes dans le paragraphe précédent, à prendre comme ordre de grandeur. Les chiffres diffèrent légèrement suivant les sources [7,8], mais demeurent néanmoins très proches.

Ces puissances installées comprennent non seulement les grandes centrales de production mais aussi les petites centrales autonomes. Ces dernières, qui ne représentent pas en fait une puissance globale importante, constituent cependant un parc d'éoliennes non négligeable.

Comme leurs grandes soeurs, elles connaissent un grand essor mais dans un esprit différent. En fait, dans le cas d'une alimentation isolée (un usager non relié au réseau), l'utilisation d'une éolienne secondée par un système photovoltaïque et/ou un groupe électrogène est devenu rentable pour un particulier. La technologie de ces centrales isolées est de plus en plus maîtrisée et le nombre de fabricants, ainsi que la gamme de puissance offerte, sont en nette progression. D'autre part, les prix de ces centrales permettent à leurs acquéreurs de pouvoir amortir leur investissement sur quelques années. Ainsi, des fabricants tels que Vergnet [10] en France, LMW Renewables [6] aux Pays-Bas ou Bergery [13] aux Etats-Unis proposent des petites centrales de moins de 15 kW. La société Vergnet propose même des unités de 60 kW. Ces dernières, dans des sites moyennement ventés, peuvent fournir la consommation d'électricité d'un foyer domestique, d'une ferme ou d'un bourg.

L'utilisation de ces petites centrales ne se limite pas à l'alimentation isolée, elles peuvent aussi être utilisées dans le cas d'un petit réseau électrique. L'expérience de l'île de la Désirade en Guadeloupe est éloquent. La société Vergnet a installé une ferme de 20 éoliennes de 25 kW chacune [10]. La petite taille de ces éoliennes les rendent très attractives dans un environnement

montagneux à fort vent. Leur installation est moins coûteuse qu'une unité de plus grande puissance, leur vitesse de rotation est plus élevée et enfin, de par leur petite taille, un système ingénieux permet de les "coucher", ce qui évite les risques de dégâts lors des cyclones.

L'essor des petites éoliennes dans les pays développés est donc essentiellement dû à un choix individuel ou de petite communauté, celui des grandes centrales de production massive est lié à des décisions de politique énergétique. A ce jour, le prix de revient du kWh produit par énergie éolienne est encore plus élevé que celui obtenu à partir de sources primaires classiques, même si la manière de calculer ce dernier reste controversée. Or, pour qu'une installation éolienne soit viable, il faut qu'elle soit rentable.

Cela peut passer, bien entendu, par une diminution des prix d'installation et de production. Ce qui suppose une production encore plus massive, une optimisation de l'installation et des composants et un nombre important d'unités. Des efforts dans ce sens sont déjà engagés. Des centrales de plus en plus puissantes, qui permettent donc de "rentabiliser" un site, sont en chantier ou en essais. La dernière génération commercialisée affiche une puissance de 1,5 à 1,6 MW et des unités sont déjà en activité. Des centrales de 4 et 6 MW sont à l'étude, voir au stade d'essais [3].

L'autre moyen sont les subventions que peuvent apporter les différents gouvernements aux producteurs de l'énergie éolienne. Cette voix est spécifique à chaque pays et constitue donc une décision de politique énergétique. Les aides peuvent prendre plusieurs aspects, soit sous forme d'aides financières directes ou indirectes aux producteurs, soit sous forme d'un prix d'achat du kWh éolien produit permettant à ces installations d'être rentables ne serait ce qu'en début d'exploitation. En effet,

ces aides sont encore primordiales pour la survie et le développement de la filière éolienne. A titre d'exemple, dans l'état de Californie, des fermes éoliennes entières ont été abandonnées depuis que l'aide publique aux producteurs a été arrêtée. Ceci explique la faible évolution de la puissance globale installée aux Etats-Unis entre 1996 et 1997.

Dans le cas des pays européens, on peut considérer deux tendances. Celle des pays nordiques qui ont décidé de diminuer, voire éliminer, leur production électrique par le nucléaire et qui privilégient des aides directes aux producteurs. Les autres pays favorisent par contre un prix d'achat spécifique pour le kWh éolien. Le tableau 3 donne les prix d'achat du kWh électrique pratiqués dans quelques pays européens [7].

Pays	Prix d'achat (en Francs)
Allemagne, Italie	0.58
Espagne, Pays-Bas, Grèce insulaire	0.49
Suède, Portugal, Grèce continentale	0.4
Belgique, Irlande, Autriche	0.3
Norvège	0.12

Tableau 3: Prix d'achat du kWh dans quelques pays européens [7]

En France, la puissance éolienne installée est encore très limitée (7 MW en 1996), mais l'intérêt s'est énormément accru ces dernières années, tant de la part des collectivités locales que de la part d'EDF. Un programme ambitieux (EOLE 2005) a été lancé depuis 1997 et vise l'installation d'une puissance de 500 MW à l'horizon 2005. Un appel d'offres a été lancé et différents projets ont été retenus. Ils sont actuellement, du moins pour ceux de la première tranche, en phase de réalisation. Pour encourager les projets, en France métropolitaine, sélectionnés dans le cadre de ce programme, EDF s'est engagée à racheter le kWh éolien durant 15 ans à un prix d'environ 0.35 F. [4,7,8,9]. Ce prix est à comparer à celui retenu habituellement par EDF pour l'achat du kWh qui est de 0.15 F pendant les sept mois d'été et 0.39 F pendant les cinq mois d'hiver [7].

### 3 Principe de fonctionnement

#### 3-1 Constitution d'une éolienne

Une éolienne est composée des parties suivantes (figure 2) [5]:

1. Un mât qui supporte la nacelle et le rotor de la turbine. Il est important que le mât soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent en hauteur. A titre d'exemple, le mât d'une éolienne de 500 kW est à une hauteur de 40 à 60 m. Il peut être plein ou tubulaire. Ce dernier est plus coûteux mais il a l'avantage de permettre un accès aisé à la nacelle pour la maintenance.

2. Deux ou trois pales qui permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Les premières éoliennes étaient munies de deux pales, cette solution, même si elle permet des vitesses de rotation plus élevées,

présente quelques inconvénients qui sont principalement les vibrations, le bruit et une fatigue accrue du rotor. Actuellement, la majorité des installations sont dotées de système tripale. Pour le même exemple d'éolienne, la longueur de chaque pale est de 20 m et leur vitesse de rotation est de 19 à 30 tr/mn.

3. Un rotor à faible vitesse. Ce dernier est traversé par les circuits du système hydraulique qui permet d'orienter les pales afin de réguler la vitesse de rotation. Ceci constitue un frein aérodynamique.

4. Un multiplicateur mécanique de vitesse.

5. L'arbre à grande vitesse ( $\approx 1500$  tr/mn) qui est équipé d'un frein à disque mécanique.

6. Le système hydraulique pour les freins aérodynamiques.

7. Un générateur électrique, généralement une machine asynchrone.

8. Un système de refroidissement pour le générateur et éventuellement le multiplicateur de vitesse.

9. Un mécanisme qui utilise des moteurs électriques pour orienter la nacelle face au vent.

10. Un système électronique qui permet de contrôler le mécanisme d'orientation ainsi que le fonctionnement global de l'éolienne.

11- Un anémomètre dont les données sont utilisées par le système électronique pour déclencher ou arrêter l'éolienne dans la plage de vitesse de fonctionnement. Dans le cas de l'exemple cité ci-dessus, cette plage se situe entre 5 et 25 m/s.

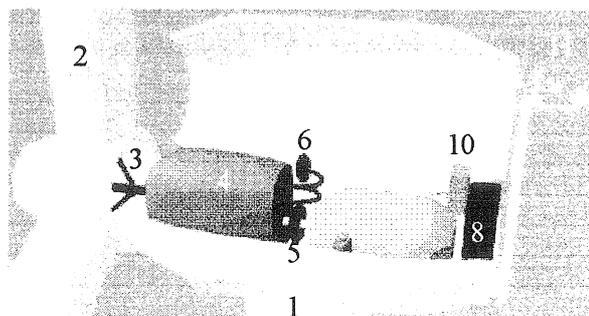


Fig 2 : Nacelle d'une éolienne [5]

#### 3-2 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'une éolienne peut s'énoncer comme suit :

A la hauteur de la nacelle souffle un vent de vitesse  $V_{vent}$ . Tant que cette vitesse est en dessous de la vitesse de seuil, les pales sont en drapeau (la surface de ces dernières est perpendiculaire à la direction du vent) et le système est à l'arrêt. A la vitesse seuil, détectée par l'anémomètre, un signal est donné par le système de commande pour la mise en fonctionnement. Le mécanisme d'orientation fait tourner la nacelle face au vent, les pales sont ensuite placées avec l'angle de calage

adéquat et commencent à tourner. Une puissance  $P_{vent}$  est alors captée et transmise à l'arbre lent avec un coefficient de performance. Au rendement du multiplicateur près, cette même puissance est retransmise à l'arbre de la génératrice à une vitesse plus élevée. Cette puissance mécanique va enfin être transformée en puissance électrique débitée par la machine. On distingue alors deux cas, soit l'éolienne est reliée au réseau de distribution (directement ou à travers des convertisseurs statiques), soit elle alimente, en autonome, une charge isolée à travers ou non des convertisseurs statiques.

Tant que la vitesse du vent est dans la plage de fonctionnement (entre  $V_{seuil}$  et  $V_{max}$ ), l'éolienne est en fonctionnement et l'angle d'incidence des pales est commandé. A partir de la vitesse maximale, on commence à diminuer les capacités de l'éolienne en utilisant les différents freins, d'abord les freins aérodynamiques, puis le frein à disque. A fort vent, les pales sont mises en drapau et l'éolienne est arrêtée.

L'expression de la puissance du vent captée par une éolienne fait appel à la théorie de la mécanique des fluides et de l'aérodynamique. En effet, cette puissance dépend d'un grand nombre de facteurs. Les plus significatifs sont la vitesse du vent, la longueur, et le profil, des pales et la densité de l'air, mais il y a aussi l'angle d'incidence du vent par rapport aux pales, l'angle de calage, etc... Une étude mécanique détaillée est donnée dans deux articles des techniques de l'ingénieur [14,15]. En définitive, la puissance cinétique totale du vent à travers un disque éolien de rayon  $R$  (en m) est donnée par la relation suivante [11,12] :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_{vent}^3 = K_p V_{vent}^3 \quad (1)$$

où  $R$  correspond pratiquement à la longueur de la pale,  $\rho$  représente la densité de l'air (celle-ci est de  $1.225 \text{ kg/m}^3$  en atmosphère normale) et  $V_{vent}$  la vitesse du vent (en m/s). Cette puissance ne peut être totalement captée, cela voudrait dire que la vitesse du vent est nulle en aval des pales. On exprime alors la puissance captée par une éolienne par :

$$P_{cap} = C_p(\lambda) \cdot P_{vent} \quad (2)$$

$C_p$ , appelé coefficient de performance ou coefficient de puissance, représente le rapport de la puissance récupérée sur la puissance récupérable. Ce coefficient, qui ne peut dépasser la valeur de  $16/27$  (limite de Betz), est fonction du rapport  $\lambda$  entre la vitesse linéaire des extrémités des pales sur la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V_{vent}} \quad (3)$$

où  $\Omega_t$  (en rad/s) est la vitesse du rotor à faible vitesse (figure 2). Sachant que la vitesse  $\Omega_r$  du rotor de la génératrice est liée à celle du rotor lent par  $\Omega_t = \Omega_r / K_G$ , où  $K_G$  représente le rapport du multiplicateur de vitesse, on peut alors exprimer le rapport  $\lambda$  en fonction de la vitesse de la machine par :

$$\lambda = \frac{\Omega_r R}{K_G V_{vent}} \quad (4)$$

Ce rapport  $\lambda$  s'appelle rapport de la vitesse en bout de pales (tip-speed ratio) ou rapport d'avance.

La puissance mécanique transmise au rotor, qui est égale à la puissance captée, s'écrit alors :

$$P_{tr} = P_{cap} = \frac{1}{2} C \left( \frac{\Omega_r R}{K_G V_{vent}} \right) \rho \pi R^2 V_{vent}^3 \quad (5)$$

Pour un angle de calage donné, le coefficient de performance de la turbine éolienne varie en fonction de du rapport  $\lambda$  d'une manière bien caractéristique [14]. Cette variation est sous forme de parabole et est généralement décrite par un polynôme. Nous montrons sur la figure 3 l'allure de cette variation.

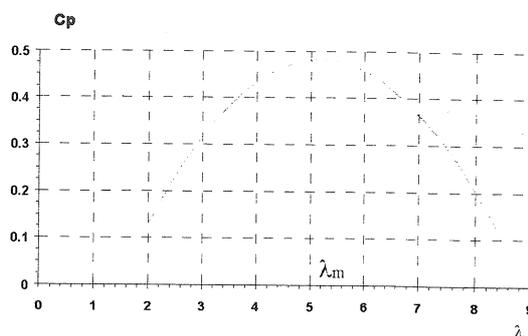


Fig 3 : Variation de  $C_p$  en fonction de  $\lambda$

A partir de cette caractéristique  $C_p(\lambda)$ , il est possible de déterminer une famille de courbes qui décrivent la puissance mécanique disponible sur le rotor de la génératrice en fonction de la vitesse de rotation des pales pour différentes vitesses du vent. Sur la figure 4 ci-dessous, nous avons tracé une famille de courbes pour une éolienne de petite puissance avec une génératrice asynchrone de 5.5 kW à 8 pôles.

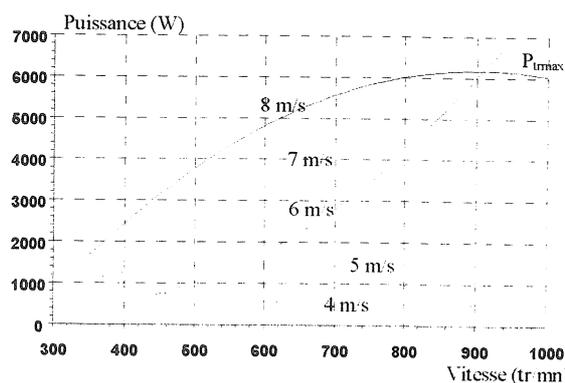


Fig 4 : Puissances escomptées en fonction de la vitesse de la génératrice pour différentes vitesses du vent

On peut noter que pour chaque vitesse de vent, il existe une vitesse de la génératrice qui permet de capter une puissance maximale.

$$P_{tr_{max}} = C_{p_{max}}(\lambda_m) \cdot P_{vent} \quad (6)$$

Il est alors possible d'élaborer des lois de commande mécanique qui permettent soit de capter une puissance

maximale ou encore une puissance constante sur une large plage de la vitesse du vent. Il suffit donc, à partir de la mesure du vent au niveau de la nacelle, de déterminer la vitesse de rotation que doivent avoir les pales pour capter la puissance désirée, et ce, en utilisant la famille des courbes tracées sur la figure 4. Une commande de l'angle de calage peut alors être effectuée pour atteindre l'objectif fixé.

En résumé, la puissance brute captée par une éolienne est proportionnelle au coefficient de performance, à la densité de l'air, au carré et de la longueur des pales et au cube de la vitesse du vent. Cette puissance, modulée par le rendement du multiplicateur de vitesse, est transmise au rotor de la génératrice. Cette dernière est alors chargée de transformer cette puissance mécanique en puissance électrique.

#### 4 Machines électriques

Dans le cas des éoliennes reliées au réseau comme dans celui des unités autonomes, les premières machines électriques qui furent utilisées étaient des machines asynchrones. En effet, cette machine est robuste du point de vue mécanique et nécessite une faible maintenance. D'autre part, il est possible de la connecter directement au réseau sans être confronté aux problèmes de l'amplitude et de la fréquence de la tension qui peuvent survenir dans le cas des machines synchrones. Enfin, les puissances élevées mises en jeu ne permettaient pas d'utiliser des convertisseurs statiques.

Depuis, d'autres solutions utilisant des machines classiques ou non sont envisagées. Quelques unes sont déjà en application ou en phase de l'être et d'autres sont encore au stade de prototype ou d'étude. Dans cette partie, nous allons, dans un premier temps, présenter et expliquer les solutions usitées. Une deuxième partie sera consacrée à quelques unes des solutions actuellement à l'étude.

##### 4-1 Solutions usuelles

###### Machines asynchrones

Les machines asynchrones équipent à ce jour la majorité des centrales éoliennes reliées au réseau. Pour des raisons d'encombrement et de prix de revient, celles qui sont utilisées sont généralement dimensionnées pour des vitesses classiques de 1500 tr/mn. Des améliorations sont apportées à la machine asynchrone usuelle utilisée en moteur, mais sont jalousement gardées par les constructeurs.

Dans le cas où elles sont reliées au réseau, ce dernier impose directement l'amplitude et la fréquence des grandeurs statoriques. Le fonctionnement en génératrice est obtenu lorsque la machine asynchrone tourne à une vitesse supérieure à celle du synchronisme. Dans ce cas, la machine génère de la puissance active qui est débitée sur le réseau, par contre elle y prélève la puissance réactive nécessaire à sa magnétisation. Le fonctionnement de la machine asynchrone en génératrice reliée au réseau

est classique [16].

Nous noterons cependant que cette solution a malheureusement l'inconvénient de ne pouvoir fonctionner que sur une plage restreinte de vitesse. Cela explique en partie l'existence d'une vitesse seuil de fonctionnement pour l'éolienne. Quelques variantes ont été apportées en utilisant des machines asynchrones avec un double bobinage induit d'un nombre de paires de pôles différent. Cela permet d'élargir la plage de vitesse de fonctionnement en utilisant l'un ou l'autre des bobinages suivant la vitesse du vent [36].

Dans le cas d'un fonctionnement autonome, le problème est tout autre. En effet, les grandeurs statoriques ne sont plus imposées et il faut fournir à la machine la puissance réactive nécessaire à la magnétisation. Le cas le plus simple consiste alors à connecter, en parallèle au bobinage statorique, un banc de capacités (figure 5).

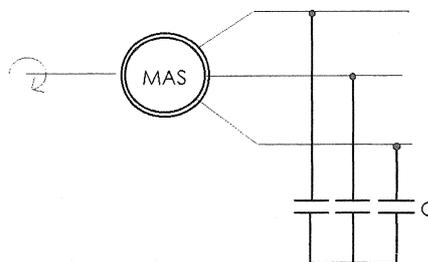


Fig 5 : Génératrice asynchrone en fonctionnement autonome excitée par des capacités parallèle

Différents travaux et applications ont été consacrés à cette solution [17,18]. Dans ce cas de fonctionnement, la vitesse de rotation de la machine doit être fixée dans une plage restreinte afin de maintenir une fréquence des grandeurs statoriques proche de 50 Hz. D'autre part, il faut calculer la valeur du banc de capacités qui permet d'obtenir l'amplitude adéquate de la tension. Cela est généralement effectué à partir du modèle équivalent par phase de la machine (figure 6) et de la courbe  $X_m(I_m)$  obtenue par différents essais à vide.

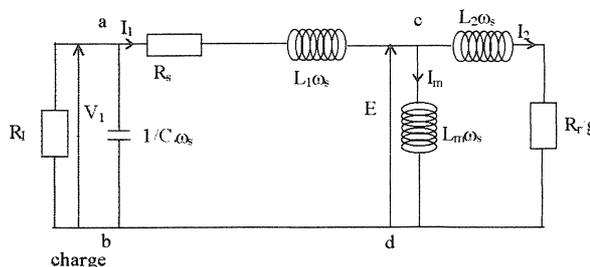


Fig 6 : Schéma équivalent par phase de la machine asynchrone

Pour calculer la valeur de la capacité minimale d'autoexcitation, la loi des mailles appliquée au circuit de la figure 6 donne :

$$Z_{ab} + Z_{ac} + Z_{cd} = 0 \quad (7)$$

En prenant la valeur linéaire pour  $X_m$ , on obtient directement celle de la capacité C en résolvant l'équation (7).

Dans le cas où le système est chargé, pour une impédance et une vitesse données, et une tension désirée, la même procédure est utilisée. Cette fois, les inconnues sont  $C$  et  $\omega$ . D'autre part  $X_m$  est une fonction non linéaire du courant magnétisant. La relation (7) aboutit en fait à deux équations (partie réelle et partie imaginaire). Il faut donc utiliser une procédure de calcul itérative (Newton-Raphson par exemple) pour déduire les valeurs de  $C$  et de  $\omega$ .

Nous avons mené au laboratoire une étude sur la génératrice asynchrone autoexcitée par un banc de capacités en parallèle. Pour une machine de 220 V, 5.5 kW et 8 pôles, nous montrons ci-dessous, à titre d'exemple, les figures 7 qui représentent respectivement l'évolution de la tension, à vitesse constante, en fonction de la puissance débitée pour différentes valeurs des capacités ainsi que la valeur minimale de la capacité, à tension constante, en fonction de la vitesse et de la puissance.

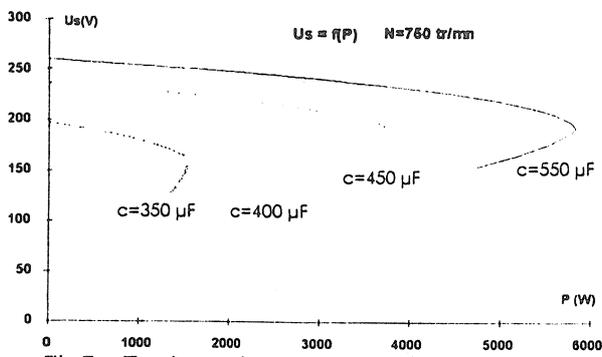


Fig 7a : Tension en fonction de la puissance débitée pour différentes valeurs de capacités

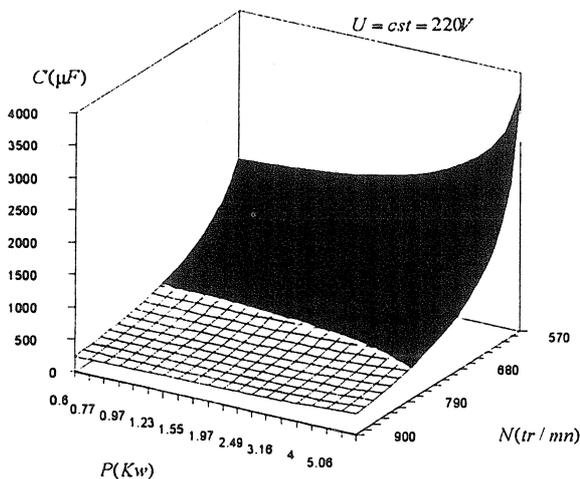


Fig 7b : Capacité requise en fonction de la vitesse et de la puissance à tension constante

Nous pouvons remarquer sur ces figures que l'amplitude de la tension chute en fonction du courant débité. Les courbes de la figure 7a rappellent d'ailleurs celles d'une génératrice à courant continu à excitation shunt.

Pour réguler la tension à la sortie de la génératrice, il faudrait en fait adapter la capacité d'autoexcitation en fonction de la charge et de la vitesse de rotation. Cela est

relativement difficile à mettre en oeuvre. Une étude, effectuée dans le laboratoire d'électronique de Dijon, ainsi qu'un dépôt de brevet ont été néanmoins dédiés à cette solution [19].

Une autre approche consiste à connecter, en plus des capacités parallèles, d'autres capacités en série avec la charge.

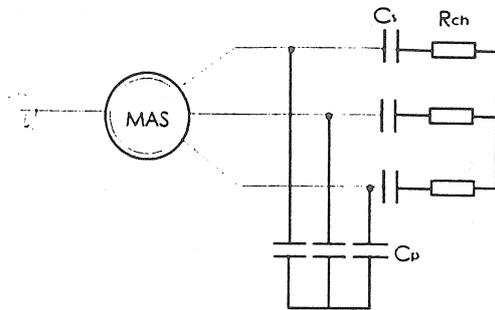


Fig 8 : Génératrice asynchrone autoexcitée par des capacités parallèle et série.

Cette approche, dénommée "short-shunt connexion" dans la littérature [20...], permet de diminuer la chute de tension en charge. Le rôle et le calcul des capacités parallèle restent identiques à la solution précédente. Par contre, les capacités en série servent de régulateurs. En effet, plus le courant de charge est élevé, plus la puissance réactive qu'elles génèrent est élevée et vice versa. Cela permet de maintenir un niveau de magnétisation pratiquement constant dans la machine et par conséquent une tension constante. De plus, en fonctionnement autonome, le système est destiné à alimenter un consommateur isolé. Cela suppose, d'une part, que la charge n'est pas forcément équilibrée et d'autre part, qu'elle peut être variable dans le temps. L'adjonction de capacités en série permet de maintenir, même en cas de charge déséquilibrée, une tension constante aux bornes de cette dernière.

Une étude, élaborée au laboratoire, a permis de mettre en évidence ce phénomène [21]. Elle a été effectuée sur la même machine asynchrone présentée précédemment en utilisant une modélisation numérique basée sur la méthode des éléments finis. Nous montrons sur la figure 9 une section de la machine étudiée ainsi que la distribution du champ pour l'essai à vide.

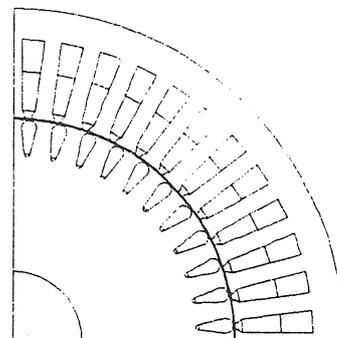


Fig 9a : Section de la machine étudiée

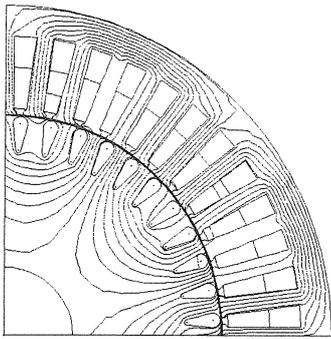


Fig 9b : Distribution des lignes de champ à vide

Les figures 10 montrent les courbes des tensions aux bornes de la machine, des capacités série et de la charge lorsque celle-ci est soudainement déséquilibrée.

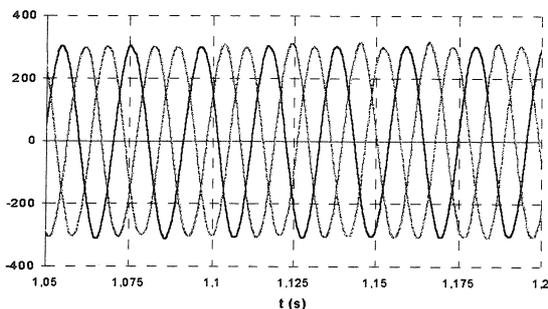


Fig 10a : Tension aux bornes de la machine

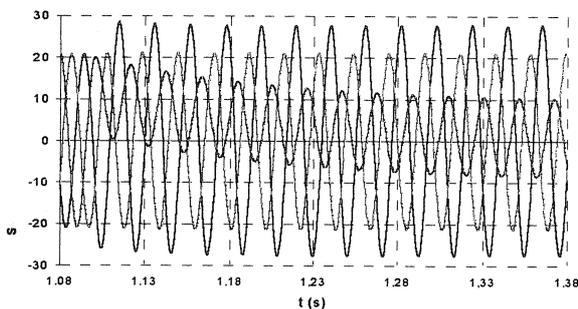


Fig 10b : Tension aux bornes des capacités série

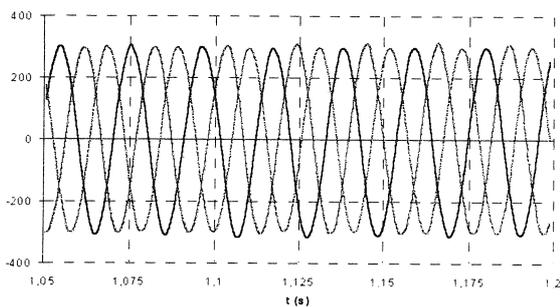


Fig 10c : Tension aux bornes de la charge

### Machines synchrones.

Dernièrement, des machines synchrones ont fait leur apparition dans le domaine des applications éoliennes. Ceci est principalement dû à la volonté d'utiliser les installations sur des plages de vitesse plus étendues ainsi qu'aux progrès de l'électronique de puissance. En effet, les machines synchrones ne sont pas soumises à la condition d'une vitesse de seuil pour fonctionner en

génératrice. Néanmoins, l'amplitude et la fréquence de la tension étant fonctions de la vitesse de rotation, il n'est pas possible de les connecter directement au réseau. Ces mêmes raisons ne permettent pas non plus leur exploitation directement en fonctionnement autonome. Il est donc nécessaire d'utiliser un redresseur puis un onduleur.

Quel que soit le mode de fonctionnement de l'éolienne (sur réseau ou en autonome), les machines synchrones utilisées sont des machines excitées par des aimants permanents à aimantation radiale ou par un système à diodes tournantes [22,36]. Les pôles sont lisses et la machine tourne, comme pour la solution asynchrone, à des vitesses de l'ordre de 1500 tr/mn. Ces structures permettent d'éviter les contacts glissants, et dans le cas de l'excitation par des aimants permanents, la dépendance d'une source extérieure. D'autre part, elles présentent des ondulations de couple très faibles.

La partie convertisseur est constituée généralement d'un redresseur non commandé et d'un onduleur à MLI. la figure 11 donne le schéma d'une installation [22].

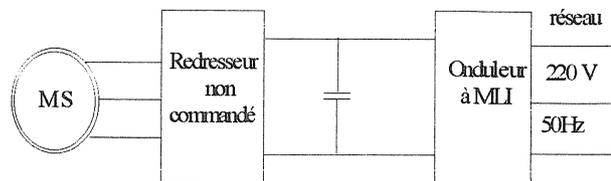


Fig 11 : Machine synchrone connectée à des convertisseurs statiques

Le fonctionnement d'un alternateur débitant sur un redresseur non commandé est classique et ne sera pas étayé ici.

### 4-2 Solutions en recherche

Les solutions qui ont été abordées dans le volet précédent sont celles qui sont communément utilisées à ce jour. Elles sont bien maîtrisées et donnent des résultats satisfaisants. Cependant, si la rentabilité d'une éolienne est tributaire du site retenu, elle l'est aussi de l'amélioration et de l'optimisation des composants qui la constituent. De grands progrès ont été faits dans le domaine mécanique et notamment sur la constitution et le profil des pales. Des avancées sur la fabrication et la composition des mâts ainsi que sur la partie automatique (asservissement et diagnostic) ont également été effectués. En ce qui concerne la partie électrique, différentes actions sont menées. On peut les diviser en trois axes:

1- Le premier vise à optimiser l'utilisation des machines existantes et plus précisément l'exploitation de la machine asynchrone sur une plus grande plage de vitesse, tant sur le réseau qu'en fonctionnement autonome.

2- Le deuxième s'intéresse à la substitution des machines électriques existantes par d'autres structures non conventionnelles permettant de réduire le prix de l'installation en remplissant les mêmes fonctions, voire les améliorer.

3- Le dernier consiste à repenser la partie conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique en remplaçant le multiplicateur de vitesse et la machine électrique classique par des machines à attaque directe (faible vitesse et fort couple). En effet, le multiplicateur de vitesse, qui représente 14% du prix de l'éolienne [7], est un dispositif mécanique qui, d'après une étude statistique européenne, tombe souvent en panne, ce qui engendre des réparations coûteuses mais surtout des périodes de non production relativement élevées.

### Machines asynchrones.

Nous avons vu que l'utilisation de la machine asynchrone directement reliée au réseau était limitée par la vitesse seuil de fonctionnement. Pour pallier cet inconvénient, une solution consiste à insérer entre la machine et le réseau, un redresseur et un onduleur. Les deux dispositifs seraient commandés en MLI.

L'utilisation d'un redresseur à MLI permet, en contrôlant la fréquence des signaux de référence, de maintenir un glissement négatif afin que la machine asynchrone fonctionne en génératrice sur une plage de vitesse beaucoup plus étendue. D'autre part, le déphasage entre les signaux de référence et les courants statoriques permet de contrôler le flux de la puissance réactive et ainsi maintenir une magnétisation optimale de la machine.

Le même dispositif peut être d'ailleurs utilisé dans le cas d'un fonctionnement autonome (figure 12).

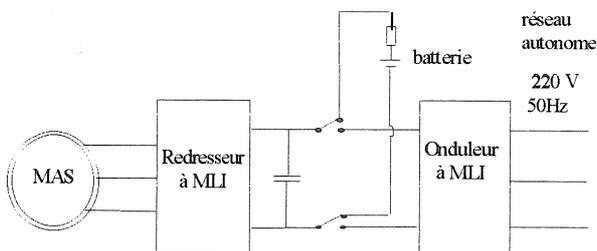


Fig 12 : Génératrice asynchrone en fonctionnement autonome

Dans ce cadre, nous avons mené une étude sur la modélisation d'une génératrice asynchrone associée à un redresseur à MLI. En utilisant le modèle de Park, prenant en compte la saturation et les effets croisés, ainsi qu'une modélisation par éléments finis, nous avons étudié le fonctionnement de la machine asynchrone lorsqu'elle débite sur un redresseur à MLI. Le système étudié est donné à la figure 13.

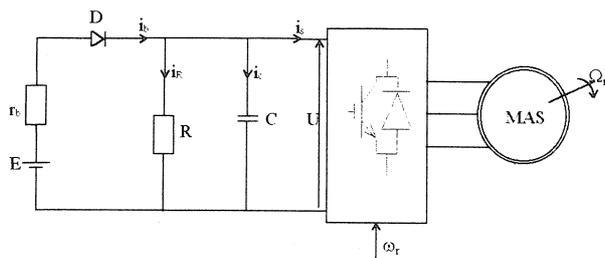


Fig 13 : Système étudié

Nous nous sommes principalement intéressés à

l'évolution de la tension à la sortie du redresseur. En effet, une fois la tension continue atteinte et régulée, le fonctionnement de l'onduleur est classique. Afin d'amorcer la génératrice, une batterie est insérée en parallèle avec une capacité. Une fois que la tension continue  $U$  dépasse celle de la batterie, cette dernière est déconnectée grâce à la diode.  $R$  représente la résistance vue du côté continu et  $r_b$  la résistance interne de la batterie.

Pour une vitesse et une charge données, il est possible de déterminer la pulsation  $\omega_s$  des tensions de référence du redresseur à MLI, qui permet d'obtenir la tension  $U$  désirée.

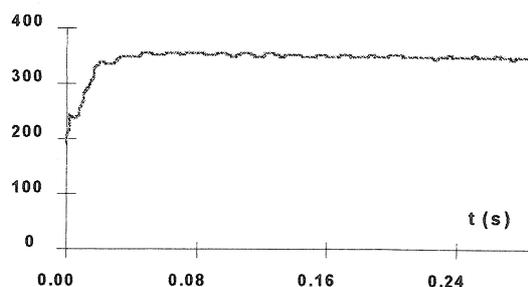


Fig 14a : Tension continue U (Modèle de Park)

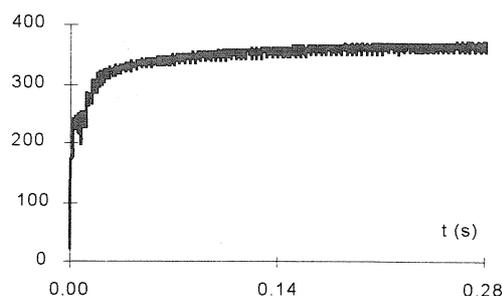


Fig 14b : Tension continue U (Méthode des éléments finis)

Dans l'exemple donné ci-dessus, pour une vitesse de 750 tr/min et une résistance de charge (côté alternatif)  $R_{ch} = 20 \Omega$ , la fréquence calculée est de 47.4 Hz pour une tension  $U = 350V$ . Nous représentons sur les courbes 14a et 14b, l'amorçage de la tension  $U$  obtenu respectivement par le modèle de Park et celui des éléments finis.

Une autre possibilité consiste à utiliser des machines asynchrones à rotor bobiné [23]. Le circuit rotorique est alors connectée au réseau à travers un redresseur et un onduleur. La commande de ce dernier permet de contrôler le glissement de la machine et de pouvoir ainsi exploiter l'installation en dehors des limites de vitesse classiques.

### Machines synchrones à réluctance variable

La machine à réluctance variable (MRV) synchrone est constituée d'un stator identique à celui d'une machine synchrone ou asynchrone classique et d'un rotor denté. Le fonctionnement de cette structure est dû à la variation de l'énergie dans l'entrefer. Cette dernière est assurée par la modulation du champ d'induit par la perméance d'entrefer. En fait, cette machine n'est autre qu'une machine synchrone à pôles saillants démunie d'excitation.

Elle fonctionne alors uniquement sur le couple de réductance. Pour assurer une conversion continue de l'énergie et un fonctionnement synchrone, le nombre de dents rotoriques  $N_r$  doit être lié au nombre de paires de pôles statoriques  $p$  par la relation :

$$N_r = 2p \quad (8)$$

Dans ce cas, la vitesse de rotation  $\Omega$  est fonction de la pulsation statorique  $\omega$  :

$$\Omega = \frac{\omega}{N_r} = \frac{\omega}{2p} \quad (9)$$

Dans sa version de base, cette machine se présente sous la forme donnée à la figure 15a où le rotor est constitué d'un empilement de tôles dentées. Le rendement, ainsi que le facteur de puissance, sont alors relativement faibles par rapport à ceux des machines classiques. Dans leurs versions optimisées, structure à guides de flux (figure 15b) ou encore axialement laminée (figure 15c), les performances des MRV synchrones peuvent être similaires à celles d'une machine asynchrone, voire meilleures [24,25].

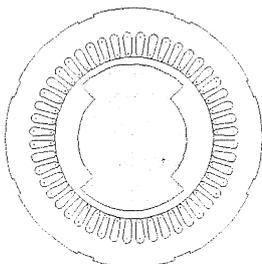


Fig 15a

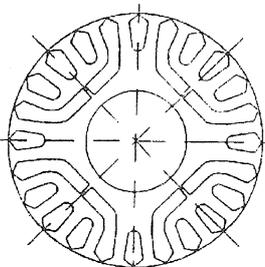


Fig 15b [26]

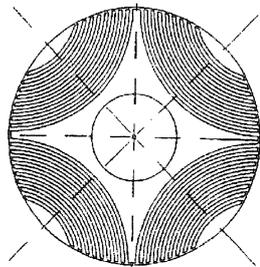


Fig 15c [24]

Fig 15 : MRV synchrone, a/structure de base, b/ structure à guides de flux, c/ structure axialement laminée

Si la MRV axialement laminée a un prix de revient élevé et est encore au stade d'essais de laboratoire, la MRV à guides de flux est déjà commercialisée [26] et son prix peut, dans le cas d'une production en série, s'avérer plus intéressant que celui d'une machine asynchrone du fait de l'absence d'un circuit rotorique. En ce qui concerne le fonctionnement en génératrice autonome, la MRV synchrone a exactement les mêmes caractéristiques que la machine asynchrone. C'est à dire qu'il faut lui apporter de l'énergie réactive soit par un banc de capacités soit par l'intermédiaire d'un redresseur à MLI. Dans le cas d'un fonctionnement sur le réseau, connectée à un redresseur-

onduleur, ses performances peuvent être tout à fait similaires à celles d'une machine asynchrone dans la même configuration, avec un prix de revient de la machine qui peut être plus intéressant.

Différentes études ont été consacrées à cette machine. Elles ont concerné l'optimisation de ses performances, et la comparaison de ces dernières avec celles des structures classiques [24,25,27], ainsi que son fonctionnement en génératrice autonome autoexcitée [28...].

D'autres études ont concerné aussi son fonctionnement lorsqu'elle est excitée et connectée au réseau. Il faut noter que cette machine peut être excitée par un second bobinage placé au stator et parcouru soit par un courant continu soit par un courant alternatif monophasé ou triphasé. Dans ce cas,  $N_r$  doit être lié à  $p$  et  $p'$ , nombre de pôles du circuit d'excitation, par la relation:

$$N_r = p \pm p' \quad (10)$$

et la vitesse de rotation est alors fonction de la pulsation du circuit d'induit et éventuellement celle du circuit d'excitation  $\omega'$  par :

$$\Omega = \frac{\omega \pm \omega'}{N_r} \quad (11)$$

Il est alors aisé d'imaginer un circuit d'excitation, traversé par un faible courant, relié au réseau par le biais d'un redresseur-onduleur. Une commande sur les convertisseurs permet alors, en fonction de la vitesse du vent, d'injecter la bonne amplitude et la bonne fréquence du courant d'excitation pour maintenir la même amplitude et la bonne fréquence du bobinage d'induit qui serait directement relié au réseau [29]. Contrairement à la solution utilisant une machine asynchrone à rotor bobiné, les contacts glissants seraient évités.

#### Machines électriques à attaque directe

Pour des raisons de simplicité, les machines électriques utilisées dans les éoliennes sont généralement des machines standards (1500 tr/mn) accouplées à un multiplicateur de vitesse. Or ce dernier est lourd, volumineux et source de fréquentes pannes.

L'idée est donc de remplacer l'ensemble multiplicateur de vitesse-machine électrique par une structure fonctionnant à faible vitesse et fort couple. Le moyen le plus simple est d'utiliser des machines classiques à grand nombre de paires de pôles. Des études sur des machines synchrones à grande polarité ont déjà été effectuées [30...] et des industriels scandinaves proposent déjà des installations utilisant ce genre de structures. On peut cependant noter que la multiplicité du nombre de paires de pôles conduit à des diamètres d'alésage qui sont relativement élevés, ce qui constitue le principal inconvénient de cette solution.

D'autres recherches et applications concernent la machine synchrone discoïde. La société Jeumont

Industrie s'intéresse à ce genre de structure [31] qui est constituée de deux stators discoïdes avec un grand nombre de paires de pôles. Le rotor est muni d'aimants permanents en NdFeB (figure 16).

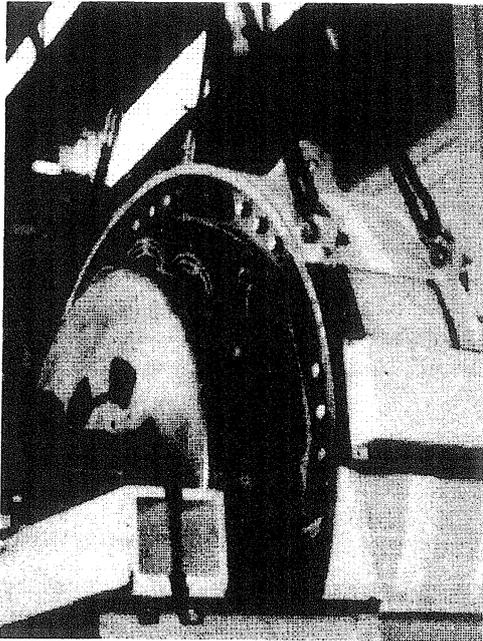


Fig 16 : Machine synchrone discoïde [31]

Jeumont Industrie a mis au point un prototype de 750 kW à attaque directe qui sera installé dans une nouvelle éolienne à Widhem dans le Pas de Calais.

Une troisième voie qui peut être intéressante est celle des machines à réluctance variable à double denture. Cette structure est constituée d'un stator à  $N_s$  dents et un rotor à  $N_r$  dents. Elle est bien connue pour son fonctionnement à fort couple et basse vitesse sans augmentation excessive de la polarité statorique. Son seul inconvénient réside dans son faible facteur de puissance, cependant l'adjonction d'un circuit d'excitation permet d'améliorer notablement ses performances [34].

Le circuit d'induit est formé d'un bobinage triphasé réparti classique à  $p$  paires de pôles. L'excitation peut être constituée par des aimants permanents au stator ou au rotor ou encore par un second bobinage au stator alimenté par du courant continu ou alternatif monophasé ou triphasé. Lorsqu'elle est excitée, une relation rigide existe entre  $N_s$ ,  $N_r$ ,  $p$  et  $p'$  qui représente la polarité de l'excitation :

$$N_s \pm N_r = p \pm p' \quad (12)$$

Dans ce cas, la vitesse de rotation  $\Omega$  est liée à la pulsation  $\omega$  de l'induit et éventuellement  $\omega'$  du circuit d'excitation par la relation :

$$\Omega = \frac{\omega \pm \omega'}{N_r \pm ap} \quad (13)$$

où "a" est égale à "1" si l'excitation est au rotor et "0" lorsque celle-ci est au stator.

Dans le cadre d'une thèse préparée au L2EP et

cofinancée par l'Agence pour le Développement et la Maîtrise de l'Energie (ADEME) et le conseil régional Nord-Pas de Calais, une étude sur une machine à réluctance variable excitée par des aimants permanents SmCo insérés au rotor en concentration de flux a été effectuée. Une structure a alors été conçue, dimensionnée et optimisée [32]. Elle a ensuite été étudiée en utilisant une modélisation analytique et une modélisation par éléments finis. Nous présentons ci-dessous la distribution du champ magnétique, à vide, dans une coupe de la machine.

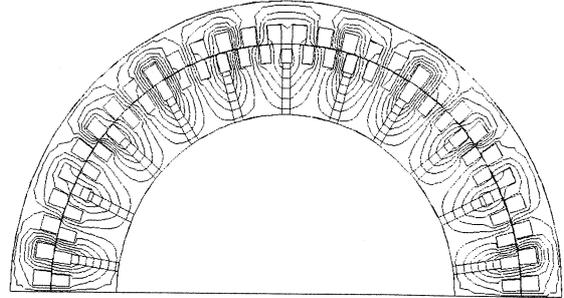


Fig 17 : MRV à double denture excitée par des aimants permanents

Les caractéristiques électriques et de denture de cette machine sont données dans le tableau 4 :

$N_s=60$	$p=5$	$\Omega=54.54\text{tr/min}$
$N_r=66$	$p'=11$	$f=50\text{Hz}$

Tableau 4: Caractéristiques de la MRV étudiée (excitation par des aimants)

Alimentée à 220 V, 50 Hz en autopiloté, cette structure développe un couple de 1200 Nm à 54.54 tr/min tout en n'ayant que 5 paires de pôles au stator.

Son fonctionnement en génératrice autonome a été étudié tant en fonctionnement sur charge résistive qu'en débitant sur un redresseur à MLI en utilisant les deux approches de modélisation. Nous présentons ci dessous la courbe de la tension continue à la sortie du redresseur à MLI ainsi que celle du couple électromagnétique lorsque la machine fonctionne à puissance maximale. Le facteur de puissance de la structure avoisine alors 0.6. Cette valeur est à comparer avec celle de ce genre de structure non excitée qui est généralement de l'ordre de 0.1-0.2 [34].

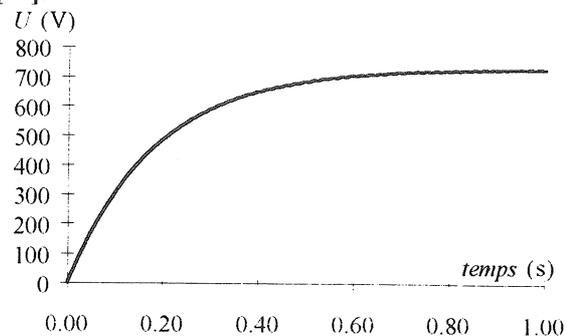


Fig 18a : Tension continue U à la sortie du redresseur à MLI

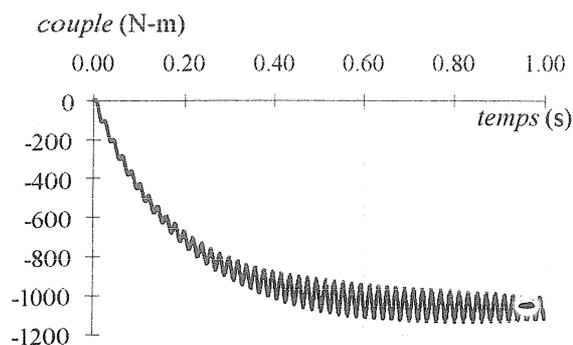


Fig 18b : Couple électromagnétique [32]

Dans la même optique, une structure similaire excitée par un second bobinage statorique parcouru par un courant triphasé a été dimensionnée et étudiée au laboratoire [33]. La figure 19a représente les lignes de champ à vide. La figure 19b montre les flux en fonction du temps, à vide et par spire, obtenus pour une excitation et une vitesse de rotation nominales.

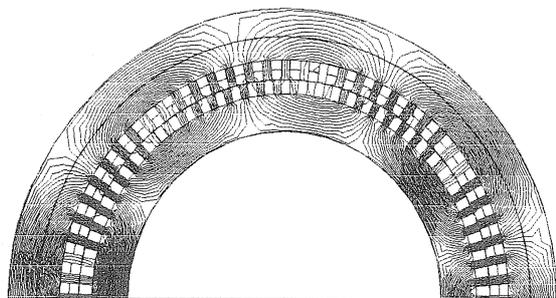
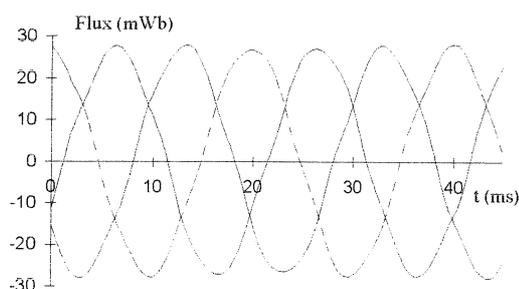


Fig 19a : MRV à double denture excitée par un bobinage statorique parcouru par un courant triphasé

Fig 19b : Flux à vide par spire de la MRV  $N = 50\text{tr/mn}$  et  $f = 11.68\text{Hz}$ 

Les caractéristiques de cette machine sont données au tableau 5.

$N_s = 72$	$p = 6$	$\Omega = 50\text{tr/min}$	
$N_r = 74$	$p' = 4$	$f = 50\text{Hz}$	$f' = 11.68\text{Hz}$

Tableau 5: Caractéristiques de la MRV étudiée (excitation par du courant triphasé)

## 5 Intérêts de l'insertion de convertisseurs statiques

La plupart des éoliennes actuelles, connectées directement au réseau ou en fonctionnement autonome sur un banc de capacités, utilisent uniquement des dispositifs mécaniques pour commander la puissance électrique débitée. Ces derniers sont :

- les servomoteurs d'orientation de la nacelle qui permettent de placer cette dernière face au vent lors des phases de fonctionnement.

- le mécanisme hydraulique qui permet d'orienter les pales afin d'adopter l'angle d'incidence adéquat pour capter une puissance du vent donnée.

Pour une puissance désirée, il est donc possible de déterminer l'angle de calage des pales ainsi que celui que doit présenter la nacelle face au vent. Ce système de commande aboutit à des résultats satisfaisants mais présente des limites et notamment une plage de vitesse de fonctionnement restreinte.

L'insertion de convertisseurs statiques, entre la génératrice et sa charge, permet d'avoir de nouveaux degrés de liberté par une commande adaptée. Ceci permet d'améliorer le fonctionnement de la centrale, qui peut se traduire par les avantages suivants [36] :

- \* des fonctionnements à basse vitesse.
- \* une diminution du bruit acoustique.
- \* une optimisation du transfert de l'énergie.
- \* une bonne gestion des transitoires vis à vis du réseau,

- \* la suppression éventuelle de quelques éléments mécaniques (système de démarrage et multiplicateur de vitesses dans quelques cas).

On peut alors agir sur les dispositifs mécaniques et sur le convertisseur statique. Ces actions seront réparties différemment suivant que l'unité fonctionne en autonome ou qu'elle soit de forte puissance et reliée au réseau. Par abus de langage, nous noterons, par la suite, commande électrique l'action sur les convertisseurs et commande mécanique celle sur les dispositifs mécaniques.

### 5-1 Centrales connectées au réseau

Dans le cas de centrales de production de masse reliées au réseau, la commande de la puissance reste principalement assurée par les différents dispositifs mécaniques. La commande électrique peut alors venir juste en appoint. Une première possibilité consiste à utiliser un redresseur à diodes et de contrôler uniquement l'onduleur. En effet, suivant les fluctuations de la tension continue à son entrée, il est nécessaire de commander ce dernier afin de maintenir une amplitude et une fréquence des tensions alternatives compatibles avec celles du réseau. D'autre part, il est tout aussi nécessaire de minimiser les harmoniques des grandeurs de sortie.

De par la nature du redresseur, ce genre de commande ne peut être utilisé que si la génératrice est excitée par un

circuit indépendant du circuit de l'induit (machine synchrone classique ou discoïde, MRV excitée...). D'autre part, il faut que l'inertie mécanique soit assez élevée pour absorber les brusques rafales de vent. Par conséquent, ce mode de régulation ne peut s'adapter actuellement qu'aux grandes unités utilisant des machines synchrones classiques ou discoïdes.

Le domaine d'application de la commande électrique peut tout naturellement être élargi en utilisant un redresseur commandé, et ce, quelle que soit la machine électrique adoptée. Dans ce cas, l'utilisation d'un onduleur et d'un redresseur commandés permet, d'une part, de fonctionner sur une plus grande plage de vitesses et d'autre part d'assurer un apport en énergie réactive. Cette dernière, nécessaire à la magnétisation d'une machine asynchrone, peut aussi être utilisée pour un fonctionnement à facteur de puissance unitaire pour des machines excitées.

Différentes études ont été consacrées à la commande des unités reliées au réseau utilisant essentiellement des machines asynchrones [35,36,37]. Nous citerons plus particulièrement un travail [35] qui a été mené par EDF en collaboration avec l'université d'Aalborg (Danemark). Cette étude a concerné l'application du principe du contrôle vectoriel, à flux rotorique orienté, à une génératrice asynchrone reliée au réseau à travers un redresseur et un onduleur à MLI. Elle a montré, d'une part, la faisabilité d'un tel contrôle et d'autre part son intérêt dans l'exploitation et la gestion de production d'un site.

### 5-2 Centrales autonomes

Dans le cas de centrales autonomes, quelle que soit la machine utilisée, l'apport de la commande électrique devient prépondérant. Elle peut même, dans le cas de centrales de petites puissances, se substituer

intégralement ou en partie à la commande mécanique. L'objectif, dans ce genre de fonctionnement, est différent de celui des grandes unités de production. En effet, la tension à la sortie de l'onduleur n'est plus imposée par le réseau. Il faut donc maintenir son amplitude et sa fréquence constantes pour une utilisation domestique, et ce, quelle que soit la vitesse de rotation de l'éolienne (sur une plage de vitesse donnée) et quelle que soit la charge connectée.

Il est alors possible, en utilisant différents principes de commande, de réguler la tension continue à la sortie du redresseur et de la maintenir constante. L'onduleur est alors chargé de fournir une tension alternative d'une amplitude et d'une fréquence données. Les stratégies les plus étudiées actuellement sont la commande vectorielle et la commande directe en couple (DTC), adaptée au fonctionnement générateur [38...].

Dans le cas des deux structures étudiées au L2EP (machine asynchrone et MRV à double denture excitée par des aimants permanents), nous avons mené des études sur l'application de la commande vectorielle, à flux rotorique orienté, dans le cas d'un fonctionnement autonome. La comparaison entre la tension continue de référence et celle mesurée permet d'aboutir à la puissance de référence. Cette dernière, connaissant la vitesse de rotation, permet d'accéder au couple de référence. La suite du schéma de commande est similaire à celui utilisé pour le fonctionnement moteur. A titre d'exemple, nous présentons, sur la figure 20, le schéma de commande utilisé pour une génératrice asynchrone en fonctionnement autonome. La figure 21 donne l'évolution de la tension  $U$  pour une variation de vitesse de 750 à 760 tr/mn et une diminution de 25% de la charge dans les deux cas de fonctionnement, en boucle ouverte et lorsque la machine est contrôlée.

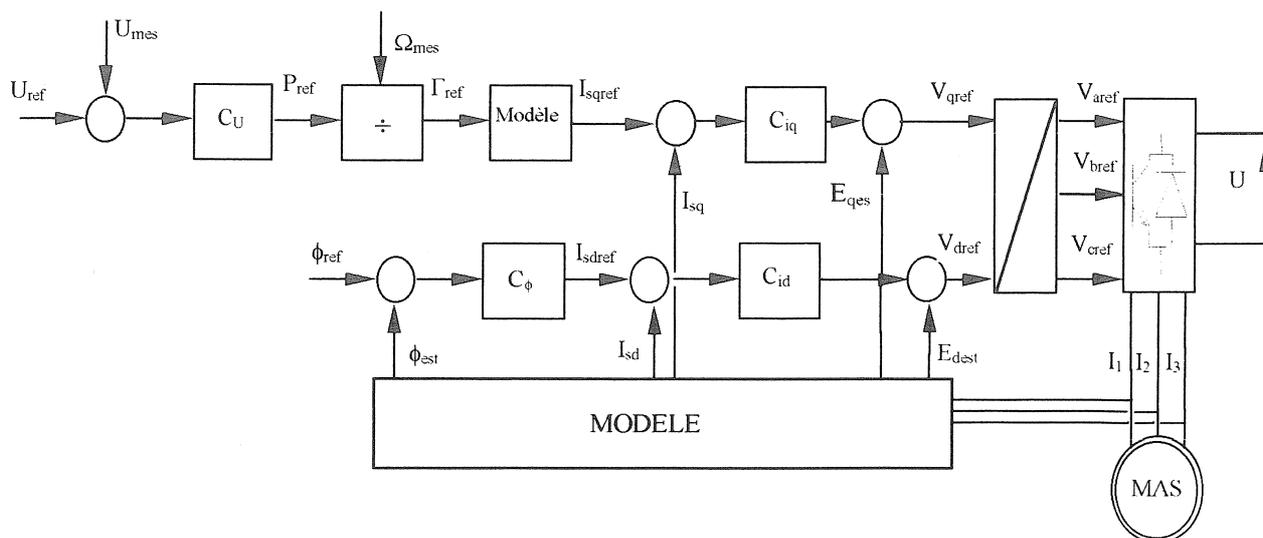


Fig 20 : Schéma de commande de la machine asynchrone en génératrice

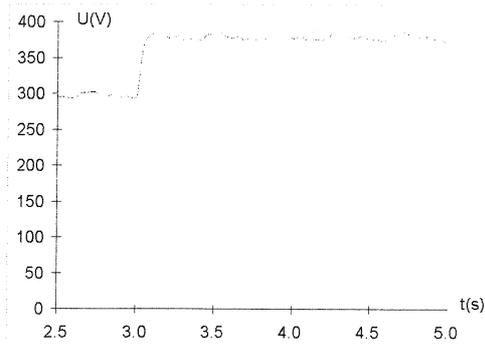


Fig 21a : Variation de la vitesse de 750 à 760 tr/min

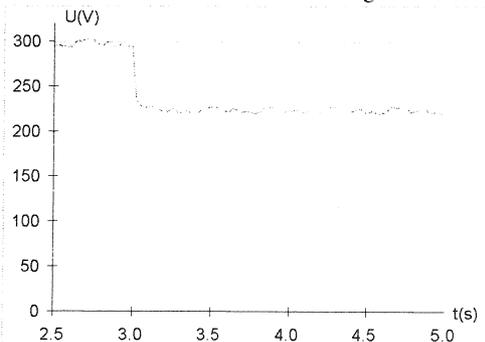
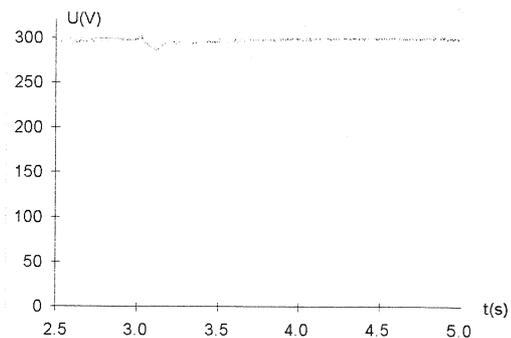


Fig 21b : Diminution de 25% de la charge.

## 6 Conclusion

L'utilisation de l'énergie éolienne pour la production de l'énergie électrique connaît un essor croissant.

Dans cette communication, nous avons donné un aperçu des dispositifs électrotechniques utilisés, ou pouvant l'être, dans le cadre de la conversion de cette énergie. La liste des solutions abordées est loin d'être exhaustive. En effet, si les principes de fonctionnement physiques sont accessibles, les solutions adoptées par les différents constructeurs sont loin de l'être. Il est néanmoins acquis que le génie électrique joue un rôle essentiel dans les centrales éoliennes et que les dispositifs actuellement utilisés sont appelés, au mieux, à être optimisés.

## 7 Références

- [1] J. Vernier "Les énergies renouvelables", que sais je? Presses Universitaires de France, 1997.
- [2] H. Chefdeville "Energies renouvelables: lancement du programme éolien français EOLE 2005" Les cahiers de l'ingénieur, n°65, Sept 1997, pp : 3-8.
- [3] Systèmes Solaires magazine, n° 124, Mars-Avril 1998.
- [4] P. Pradel "Lancement du projet EOLE 2005" L'environnement magazine, n°1558, Juin 1997, pp : 48-49
- [5] Site Web sur l'énergie éolienne au Danemark <http://www.windpower.dk>
- [6] Site Web sur l'énergie éolienne au Canada <http://www.eole.org>
- [7] Serveur de la société Espace Eolien Développement (EED) <http://www.espace-eolien.fr>
- [8] B. Multon "L'énergie sur la terre: analyse des ressources et de la consommation. La place de l'énergie électrique" Revue 3EI, Septembre 1998, pp : 29-38.
- [9] Tout savoir sur la filière éolienne. Brochure éditée par la région Nord-Pas de Calais Janvier 1997.
- [10] Serveur de la société VERGNET <http://www.vergnet.fr>
- [11] C. Velayudhan Nayar, J. H. Bundell, "Output power controller for a wind-driven induction generator", Trans. on Aerospace and Electronic Systems, IEEE, vol. 23, No 3, pp : 388-401, Mai 1987.
- [12] E.W. Golding "The generation of electricity by wind power" London. E & F Spon. Ltd, 1976.
- [13] Serveur de la société BERGEY <http://www.bergey.com>
- [14] J-F Deshayes "Calcul des performances des hélices aéromotrices" Science et technique de l'ingénieur B1361, pp : 1-16
- [15] J. Martin "Energie éolienne" Science et technique de l'ingénieur B1360, pp: 1-21.
- [16] M. Mouille et C. Petit "Génératrices asynchrones" Technique de l'ingénieur. Vol D3 II, pp : D452-1, D452-12.
- [17] R.J. Harrington, F.M.M. Bassiouny "New approach to determine the critical capacitance for self excited induction generators" IEEE Trans on Energy Conv, vol 13, n°3, Septembre 1998, pp : 244-249.
- [18] L Wang, C.H. Lee "A novel analysis on the performance of an isolated self-excited induction generator" IEEE Trans on Energy Conversion, Vol 12, n°2, Juin 1997, pp : 109-117.
- [19] P.Gorria et D. Laurent "Procédé et installation de régulation en tension d'une machine asynchrone utilisée en génératrice autonome, par variation échelonnée d'une batterie de condensateurs connectés sur le réseau" Brevet national n°84-11866.
- [20] L. Shridar, B. Singh, C.S. Jha " Transient performance of the self regulated short shunt self excited induction generator" IEEE Trans on Energy Conversion, Vol 10, n°2, Juin 1995, pp : 261-267.
- [21] S Brulé "Etude, par la méthode des éléments finis, d'un générateur asynchrone autoexcité en short shunt dans le cas de charge déséquilibrée" Rapport intermédiaire de thèse, USTL, Octobre 1998.
- [22] J. Birk, E. Ritchie "The dynamic performance of windmill driven

- permanent magnet synchronous generators feeding a network through an AC/DC/AC converter" Université d'Aalborg, 1994.
- [23] C. Velayudhan Nayar, J. H. Bundell, "Output power controller for a wind-driven induction generator", *Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, IEEE, vol. 23, No 3, pp : 388-401, Mai 1987.
- [24] D. Miljavec, P. Jereb "Synchronous reluctance motor and induction motor using the same stator frame" *ICEM 96*, Vol 2, pp : 435-439.
- [25] J.H. Hsu, S.S.P. Liou, H.H. Woodson "Comparison of the nature of torque production in reluctance and induction motors" *IEEE Trans on Energy Conversion*, Vol 5, n°2, Juin 1990, pp : 304-309.
- [26] Notice commerciale de la société "Savoie transmissions" filiale du groupe ABB.
- [27] M.J. Kamper, F.S. van der Merwe, S. Williamson "Direct finite element design optimisation of the cageless reluctance synchronous machine" *IEEE Trans on Energy conversion*, vol 11, n°3, Septembre 1996, pp : 547-555.
- [28] A.L. Alolah "Capacitance requirements for three phase self excited reluctance generators" *IEE, Proc C*, Vol 138, n°3, Mai 1991, pp : 193-198.
- [29] L. Xu, Y. Tang, "A novel wind-power generating system using field orientation controlled doubly excited brushless reluctance machine" *IEEE Proceedings IAS*, 1992, pp : 408-413.
- [30] P. Lampola, J. Väänäen "Analysis of a low speed Permanent-Magnet wind generator connected to a frequency converted" *I.C.E.M 96 vol II* pp : 393-398.
- [31] R. Michaux, P. Letellier "Les machines discoïdes à champ axial dans les systèmes de propulsion électrique" *REE*, n°3, Mars 1997, pp : 37-42.
- [32] I. Haouara "Contribution à l'étude, la modélisation et l'optimisation d'une structure de machine à réluctance variable excitée par des aimants permanents" Thèse de Génie Electrique, USTL, Juillet 1998.
- [33] S. Taibi, I. Haouara, A. Tounzi, F. Piriou "Etude de MRV excitées pour des applications en entraînement direct", communication qui sera présentée à CEMD 99, Cachan, 4 Février 1999.
- [34] F. M. Sargos "Etude théorique des performances des machines à réluctance variable" Thèse de Doctorat d'état, INPL Nancy, Mars 1981.
- [35] G. Tremmel "L'énergie éolienne en plein essor- un parc éolien de 6MW sur le plateau du Golan" *Revue ABB*, Juin/Juillet 1994, pp : 4-9
- [36] A. David, N. Buchneit, H. Jakobsen "Wind generator with electronic variable speed drive" Collection de notes internes EDF-DER, n° 96NB00166.
- [37] R.S. Pena, J.C. Clare, G.M. Asher "Vector control of a variable speed doubly fed induction machine for wind generation systems" *EPE Journal*, Vol 6, n°3-4, Décembre 1996, pp : 60-67.
- [38] P. G. Casielles, J. Sanz, J. Pascual, "Design, installation and performance analysis of a control system for a wind turbine driven self-excited induction generator", *European Community Wind Energy Conference*, Madrid Spain, pp : 559-563, 10-14 September 1990.

# EOLIENNES ET VITESSE VARIABLE

**Marc BUDINGER**  
LEEI-ENSEEIH  
Laboratoire d'Electrotechnique et  
d'Electronique Industrielle.  
marc\_budinger@yahoo.com

**Dimitri LERAY**  
LGMT-INSA Toulouse  
Laboratoire de Génie Mécanique  
de Toulouse  
Dimitri.leray@gmm.insa-tlse.fr

**Yves DEBLEZER**  
Division Nouveaux Marchés  
Jeumont Industrie  
27, rue de l'Industrie  
59 573 Jeumont

## Résumé.

Une éolienne a pour but de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Pour avoir une conversion efficace il faut avoir une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse :

- du capteur mécanique (les pales de l'éoliennes) ;
- du générateur électrique (alternateur et son électronique de commande).

Les solutions modernes permettent d'arriver à cette adéquation en utilisant :

- l'attaque directe de l'hélice : réalisable par les caractéristiques fort couple/basse vitesse des générateurs à aimant permanents à grand nombres de pôles ;
- l'électronique de puissance et la vitesse variable pour s'adapter de manière optimale à un vent fluctuant.

## A. Energie maximale récupérable

### 1. Energie du vent

Cette énergie est l'énergie cinétique de l'air. Pendant un temps  $dt$  une surface fictive  $S$  voit passer un volume d'air  $dV$  :

$$dV = dx \cdot S = v \cdot dt \cdot S$$

Qui correspond à une masse  $dm$  :

$$dm = \rho \cdot dV = \rho \cdot v \cdot dt \cdot S,$$

avec  $\rho$  la densité volumique de masse de l'air.

Cette masse  $dm$  a pour énergie cinétique :

$$Ec = \frac{1}{2} dm \cdot v^2$$

D'où la puissance traversant une surface d'aire  $S$  :

$$P = \frac{dEc}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3$$

L'énergie récupérable est donc fonction de :

- la densité de l'air ;
- la surface balayée par le capteur (d'où la tendance à augmenter le diamètre des pales) ;
- la vitesse des vents et de leur durée.

Pour ce dernier point on trace par site une courbe de fréquence donnant pour chaque vitesse de vent le nombre d'heures (ou pourcentage de l'année) correspondant.

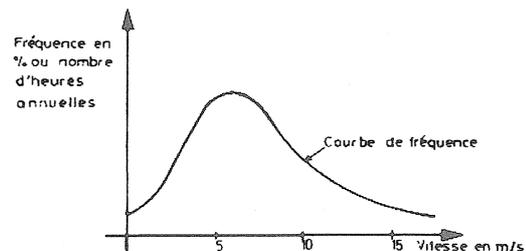


Figure 1 : Courbe de fréquence des vents

A partir de cette dernière on peut calculer la répartition énergétique du vent. Cette énergie est proportionnelle à la durée et au cube de la vitesse du vent :

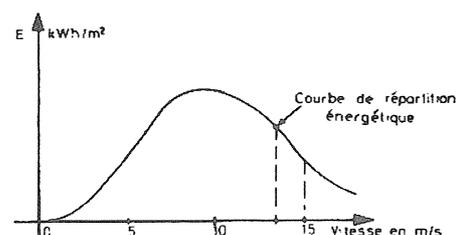


Figure 2 : Courbe d'énergie des vents

L'énergie totale récupérable sur l'année est l'aire sous la courbe de répartition énergétique pondérée par la plage de vitesse admissible par l'éolienne. On voit l'intérêt d'avoir un générateur pouvant s'adapter à une plage de vitesse bien choisie et suffisamment large.

## 2. Loi de Betz

La première limitation à la récupération totale de cette énergie est exprimée par la loi de Betz. Elle correspond au fait qu'il faut évacuer l'air qui a travaillé dans le capteur.

Si on suit une masse d'air  $dm$ , on peut observer :

- une diminution de la vitesse car l'air a donné une partie de son énergie ;
- un étalement du tube de fluide pour conserver le débit (augmentation de la section  $S$ ).

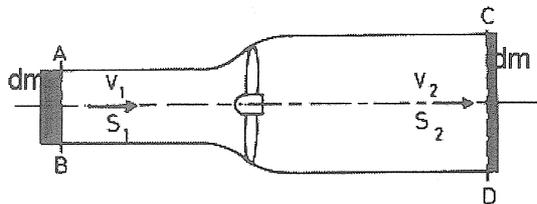


Figure 3 : Veine de vent

Estimons la force qui provoque ce phénomène. Le premier principe de la mécanique nous dit que :

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$$

Exprimons la variation de la quantité de mouvement d'une masse d'air  $M+dm$  autour d'un volume de contrôle  $V$  délimité par ABCD.

A l'instant  $t$ , la masse d'air  $M+dm$  correspond au rectangle noir de gauche et à  $V$  :

$$p(t) = dm \cdot v_1 + p_v$$

A l'instant  $t+dt$ , la masse d'air  $M+dm$  correspond au rectangle noir de droite et à  $V$  :

$$p(t + dt) = dm \cdot v_2 + p_v$$

Entre les deux instants  $t$  et  $t+dt$ ,  $V$  correspondant au volume commun ABCD reste dans un état constant, on a donc :

$$dp = p(t + dt) - p(t) = dm \cdot (v_1 - v_2)$$

Le débit se conservant et en supposant l'air incompressible :

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 = S \cdot v$$

Et :

$$dm = \rho \cdot v \cdot dt \cdot S$$

d'où :

$$F = \frac{dp}{dt} = \rho \cdot V \cdot S \cdot (v_1 - v_2)$$

La puissance absorbée est donc de la forme :

$$P = F \cdot v = \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot (v_1 - v_2)$$

En appliquant le théorème de l'énergie cinétique à l'élément  $dm$  et en dérivant on obtient directement une autre expression de cette puissance :

$$P = \frac{dEc}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dm}{dt} \cdot (v_1^2 - v_2^2)$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2)$$

En égalisant ces deux expressions de  $P$ , on obtient :

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

D'où :

$$P = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot (v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2)$$

Pour une vitesse de vent  $v_1$  donnée, cette expression trouve un maximum pour

$$v_2 = \frac{v_1}{3}$$

Soit :

$$P_{\max} = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^3 = \frac{16}{27} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^3\right)$$

De plus :

$$S_1 \cdot v_1 = S \cdot v \text{ et } v = \frac{v_1 + v_2}{2} = \frac{2}{3} v_1$$

On a alors :

$$P_{\max} = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^3 = \frac{8}{9} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_1 \cdot v_1^3\right)$$

L'énergie maximale susceptible d'être recueillie par l'éolienne est au plus 8/9 de l'énergie cinétique de l'air qui la traverse.

## B. Caractéristiques du capteur mécanique

### 1. Portance et Traînée d'un profil : De l'aile d'avion...

Sur une voilure type aile d'avion, de section constante, on définit les forces résultantes appliquées par l'air sur le profil :

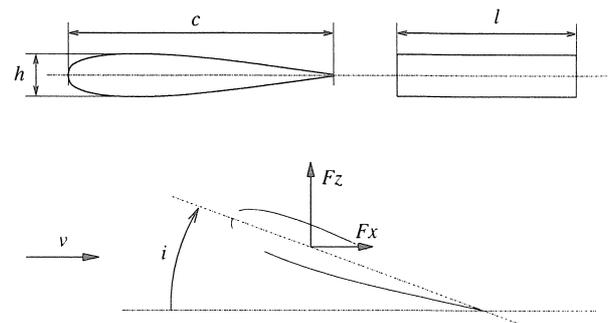


Figure 4 : Aile d'avion et forces résultantes

avec :

- $v$  la vitesse du vent (par rapport au profil) ;
- $i$  l'angle d'incidence ;
- $F_z$  la force de portance ;
- $F_x$  la force de traînée.

$F_z$  et  $F_x$  sont pris de la forme habituelle :

$$F_x = \frac{\rho \cdot A}{2} v^2 \cdot C_x(i)$$

$$F_z = \frac{\rho \cdot A}{2} v^2 \cdot C_z(i)$$

où :

- $A$  désigne l'aire de la surface projetée :  $A = l \cdot h$
- $\rho$  la densité de l'air
- $C_x$  le coefficient de portance du profil
- $C_z$  le coefficient de traînée du profil

Attention ! Les forces  $F_z$  et  $F_x$  peuvent être exprimées dans différentes bases : base liée à la direction du vent relatif ou base liée au profil. On utilisera la première dans ce qui suit.

Notons que les coefficients  $C_x$  et  $C_z$  sont fonctions de l'incidence. A titre d'information, on donne l'allure :

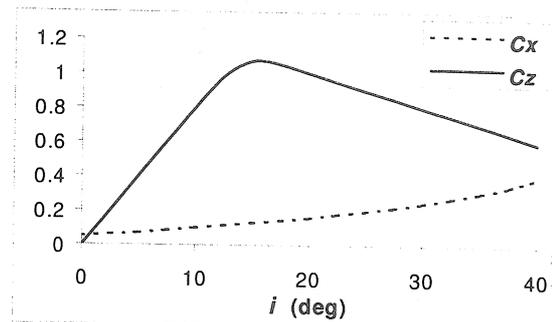


Figure 5 : Coefficients de portance et de traînée

On observe en particulier la chute brutale de portance au delà de  $15^\circ$  (phénomène de décrochage).

## 2. ...à la pale d'éolienne

Considérons une section S d'une pale d'éolienne :

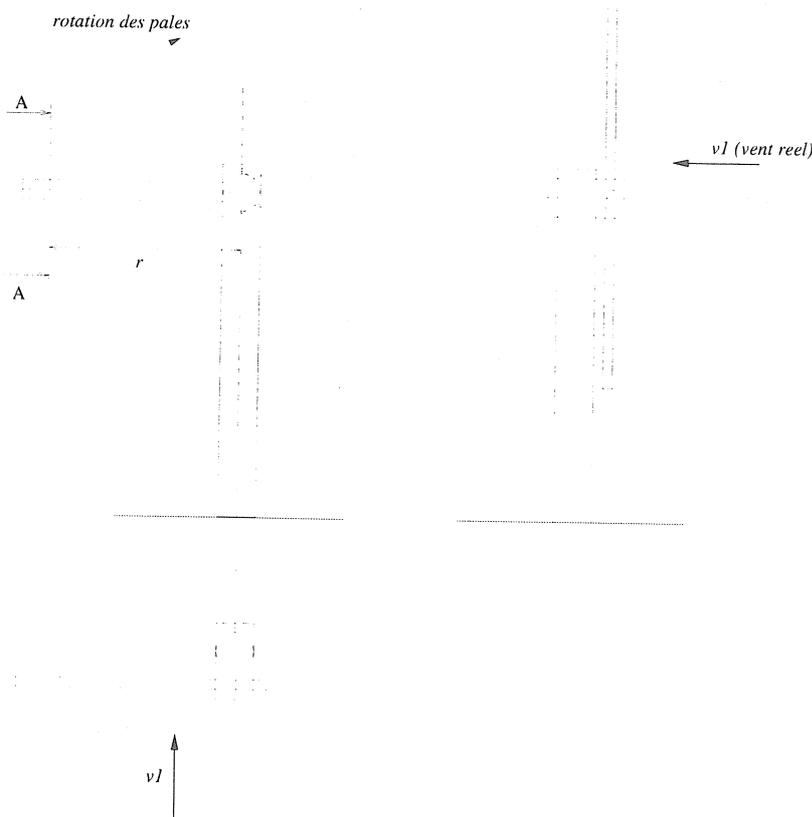


Figure 6 : vue globale de l'éolienne

- $r$  est la distance de l'axe de l'hélice au plan de la section choisie (plan défini par A-A),
- $v_1$  est l'intensité du vent (i.e. le vent par rapport au sol).

On suppose que l'axe de l'hélice est aligné avec le vent, qui est uniforme et constant.

Le profil considéré "voit" d'une part le vent réel  $v_1$ , mais aussi le vent relatif  $v_2$  qui est dû à la vitesse de la section elle-même par rapport au sol.

Ainsi avec la somme vectorielle  $v_1 + v_2 = v$ , on se retrouve dans la situation de l'aile d'avion :

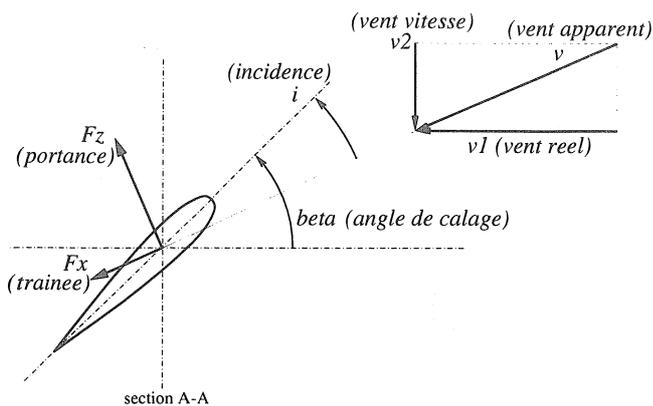


Figure 7 : profil de la pale d'éolienne (correspond au plan de section A-A de Figure 6)

- ici l'angle  $\beta$  caractérise le positionnement de la pale par rapport à l'axe de l'hélice (angle dit de calage)
- le vent relatif est donné par  $v_2 = \omega \cdot r$  ( $\omega$  vitesse de rotation de l'hélice).

Les forces appliquées par l'air sur une portion de longueur  $l$  de la pale sont donc encore :

$$F_x = \frac{\rho \cdot A}{2} v^2 \cdot C_x(i) \text{ et}$$

$$F_z = \frac{\rho \cdot A}{2} v^2 \cdot C_z(i)$$

Et le couple moteur que pourra fournir l'hélice sera l'intégrale, sur toutes les pales, des couples

$$M = r \cdot (F_z \cdot \cos(\beta - i) - F_x \cdot \sin(\beta - i))$$

comme  $v^2 = v_1^2 + v_2^2$  on a :

$$M = r \frac{\rho A}{2} (v_1^2 + v_2^2) \cdot [C_z(i) \cdot \cos(\beta - i) - C_x(i) \cdot \sin(\beta - i)]$$

et la puissance fournie est :

$$P = \omega r \frac{\rho A}{2} (v_1^2 + v_2^2) \cdot [C_z(i) \cdot \cos(\beta - i) - C_x(i) \cdot \sin(\beta - i)]$$

Si on trace P en fonction de la vitesse de rotation de l'hélice  $\omega$

(en remarquant  $v_2 = \omega \cdot r$  et  $i = \beta - \arctan \frac{\omega \cdot r}{v_1}$ ),

on obtient une courbe, à vitesse de vent réel fixée, d'allure :

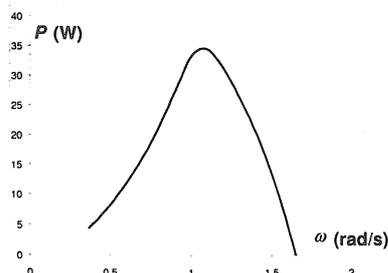


Figure 8 : Caractéristique puissance/vitesse de rotation du capteur mécanique

## C. Adéquation générateur/capteur mécanique

### 1. Intérêt de la vitesse variable

Pour la suite on se place dans le cas des éoliennes à pas fixe. On peut également réaliser des systèmes à pas variable pour s'adapter à la vitesse du vent, mais une pale fixe a l'avantage de la simplicité mécanique et de la robustesse.

Un angle de calage est choisi à l'installation de l'éolienne pour avoir une bonne adéquation entre la courbe de puissance des vents du site et la plage des vitesses de rotations de l'alternateur éolien.

Pour différentes vitesses de vent réel on obtient, en traçant les courbes P- $\omega$  (Figure 8), un réseau de courbes de la forme :

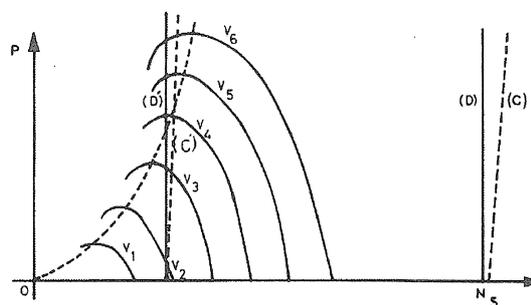


Figure 9 : Caractéristiques puissance/vitesse de rotation

En ordonnée on trouve la puissance mécanique reçue et en abscisse la vitesse de rotation de l'éolienne.

- Courbes  $v_1, v_2, \dots, v_6$  : puissance reçue en fonction de la vitesse de rotation, pour différentes vitesses de vent réel
- (D) : caractéristique d'un alternateur synchrone
- (C) : caractéristique d'un alternateur asynchrone

Si l'alternateur (synchrone ou asynchrone) est directement relié au réseau, ce dernier va imposer une plage étroite de vitesse de rotation (une vitesse fixe pour le synchrone, un faible glissement pour l'asynchrone).

On n'utilise alors de manière optimale qu'une vitesse de vent. Pour une autre intensité de vent seule une fraction de la puissance maximale sera récupérée.

Si au contraire l'alternateur est relié au réseau via un convertisseur statique, le réseau n'impose plus sa fréquence à l'éolienne. Par la commande du convertisseur on asservit la vitesse de rotation pour optimiser la puissance débitée en fonction du vent (on suit la courbe en pointillés des puissances max.).

## 2. Solution de Jeumont Industrie

La solution de Jeumont Industrie est constituée :

- d'un alternateur discoïde ;
- d'un convertisseur statique de type onduleur-redresseur MLI. à IGBT.

L'alternateur discoïde est une machine à champ axial. Contrairement aux machines classiques à champ radial où les conducteurs et les pôles sont disposés le long de génératrices d'un cylindre, ceux-ci sont disposés sur les rayons d'un disque. L'avantage de cette structure est de pouvoir multiplier le nombre de surface d'entrefer par ajout de disques et d'avoir une puissance massique importante.

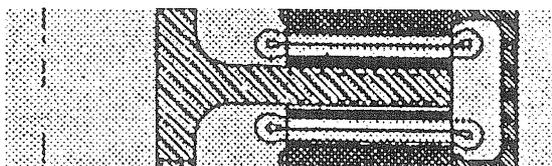


Figure 10 : Demi-disque et bobinage correspondant

Cette technologie est particulièrement efficace avec un nombre important de pôles. Ces derniers sont constitués d'aimants permanents terres rares NdFeBo qui permettent malgré la petitesse des pôles d'avoir une induction dans l'entrefer importante (comparativement à des pôles bobinés où l'induction est proportionnelle à leur taille). Cet entraînement à vitesse lente permet de se passer du multiplicateur et d'avoir une attaque directe. Les multiplicateurs de fortes puissance (>700 kW) et à grand rapport de vitesses présentent des problèmes de fiabilité et de vieillissement précoce lorsqu'ils sont soumis à des charges variables. La maintenance de ce type d'appareil en haut d'un mât peut se révéler très coûteuse.

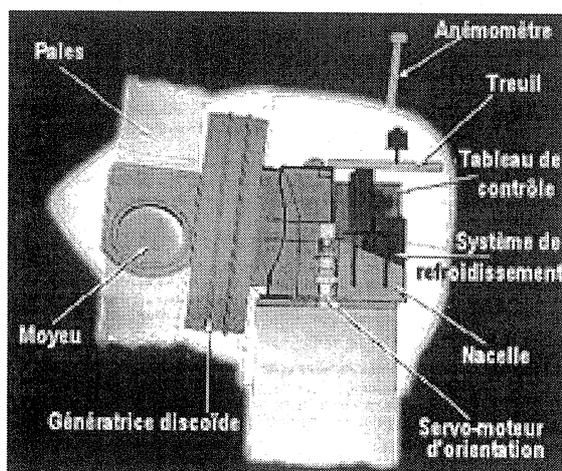


Figure 11 : Nacelle de la J148

Le convertisseur MLI côté machine permet d'utiliser l'alternateur à son rendement maximum et de commander la vitesse de l'éolienne de manière à optimiser le transfert de puissance :

- par vent faible la consigne de vitesse est lue dans une table mémoire fonction de la vitesse du vent (mesurée par anémomètre) ;
- pour des vents plus forts le fonctionnement se fait à puissance constante (la puissance nominale).

L'asservissement de vitesse permet également de freiner et d'arrêter l'éolienne en cas de vents trop violents. Un frein mécanique double le frein électrique et assure le verrouillage à l'arrêt.

L'onduleur MLI alimente le réseau à tension et fréquence fixe par l'intermédiaire d'un transformateur BT/HTA. Il permet de fonctionner à cos  $\phi$  unitaire et de limiter la pollution réseau en courants harmoniques. C'est lui aussi qui régule la tension du bus continu.

Actuellement une éolienne de 750 kW est installée à WIDEHEM (Nord-Pas de Calais) et sera bientôt rejointe par 5 autres de mêmes puissances.

Puissance nominale	750 kW
Hauteur du moyeu	46 m
Diamètre des pales	48 m
Vitesse de rotation	9 à 25 tr/min
Vitesse nominale du vent	13,14 m/s
Vitesse du vent au démarrage	3 m/s
Vitesse maximale du vent	25 m/s

Caractéristiques de la J148

## **D. Bibliographie**

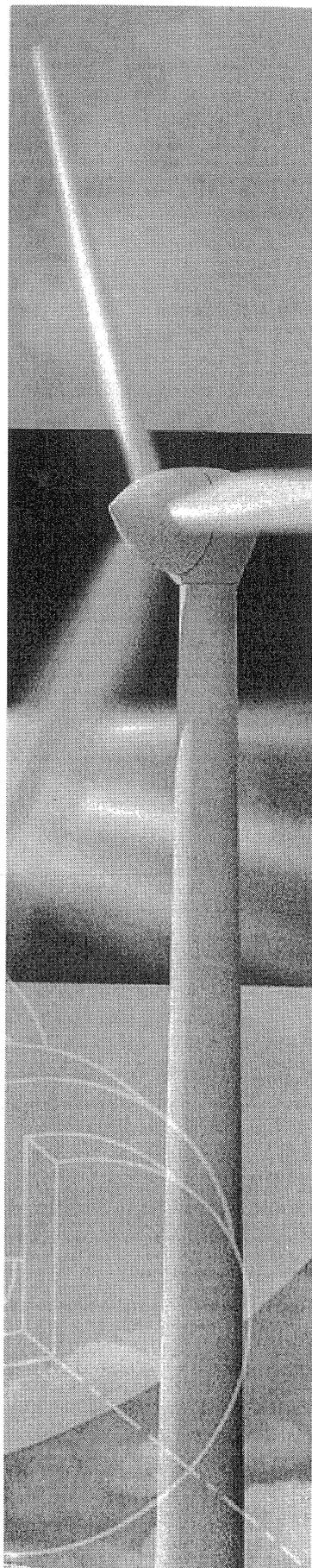
*Energie Eolienne*  
Désiré Le Gourières  
Eyrolles

*Les entrainements de fortes puissances et à très basses vitesses*  
P. Letellier - Jeumont Industrie  
CEMD'99 Cachan

*La variation électronique de vitesse au service de la production d'énergie électrique par éolienne*  
C. Saget  
REE juillet 1998

*Energies Eoliennes*  
J. Martin  
Techniques de l'Ingénieur

[www.WINDPOWER.dk](http://www.WINDPOWER.dk)



## ALIMENTATION EN EAU D'UNE BERGERIE AVEC POMPAGE AU FIL DU SOLEIL.

André BERARD, Claude GARNIER, Fernand PIALAT,  
Lycée Ph. De Girard, BP 848,  
84 082 AVIGNON CEDEX



### SOMMAIRE

#### **Introduction :**

L'énergie solaire en STS Electrotechnique.

#### **Expression du besoin :**

Alimentation en eau et en électricité d'une bergerie.

#### **Architecture de l'installation :**

Configuration en fonction des conditions atmosphériques.

#### **Caractéristiques des équipements retenus :**

La remorque photovoltaïque, une unité de production autonome.  
La pompe submersible.

#### **Limite de la présentation**

Pomper l'eau « au fil du soleil »

#### **Etude de l'association panneaux solaires pompe :**

Essais préalables.

Moteur de la pompe directement alimenté par le panneau.

Moteur de la pompe alimenté par l'intermédiaire de l'adaptateur d'impédance.

#### **Elaboration de l'adaptateur d'impédance :**

Hypothèses retenues.

Schéma bloc du système

Schéma synoptique de l'adaptateur.

#### **Conclusions .**

#### **Limite de la présentation**

Pomper l'eau « au fil du soleil »

#### **Etude de l'association panneaux solaires pompe :**

Essais préalables.

Moteur de la pompe directement alimenté par le panneau.

Moteur de la pompe alimenté par l'intermédiaire de l'adaptateur d'impédance.

#### **Introduction :**

l'énergie solaire en STS Electrotechnique

Enseignants de Génie Electrique en classe de STS Electrotechnique en Avignon, nous travaillons avec des partenaires industriels qui développent et installent des installations Photovoltaïques.

Les installations, développées à partir de Générateurs Photovoltaïques, permettent aux enseignants de Construction de Génie Electrique, de Physique et de Gestion de travailler sur des supports industriels pertinents. L'électrotechnicien dont le métier est lié aux fonctions, **Produire, Stocker, Distribuer et Transformer** l'énergie électrique, peut trouver dans les installations solaires une source d'étude et de développement très riche. D'autre part le marché que représente l'activité des énergies renouvelables est un créneau d'emploi non négligeable pour les futurs techniciens que nous formons.

Cet article présente un exemple d'utilisation d'une unité de production d'énergie électrique à partir du soleil et un exemple d'exploitation pédagogique. L'étude et la réalisation ont été effectuées par des étudiants dans le cadre de l'Epreuve Professionnelle de Synthèse du BTS Electrotechnique.

#### **Expression du besoin :**

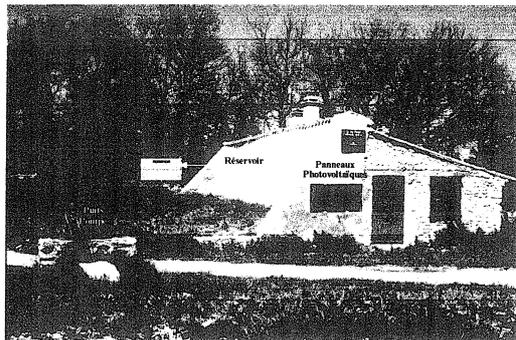
alimentation en eau et en électricité d'une bergerie.

De nombreux sites, pour des raisons techniques, financières ou écologiques, ne peuvent pas être raccordés au réseau électrique traditionnel. La production d'électricité à partir des énergies renouvelables est tout à fait adaptée dans ce cas.

L'installation solaire étudiée doit être installée dans le Mont Ventoux au lieu dit "Jas Forest"; cet endroit est un lieu de transhumance d'avril à octobre.

Cette installation mobile doit assurer les besoins en eau potable du berger et des brebis et l'éclairage de la bergerie. L'eau doit être relevée par une pompe électrique immergée et stockée dans un réservoir. Un pompage « au fil du soleil » doit permettre une autonomie du système de pompage. L'énergie

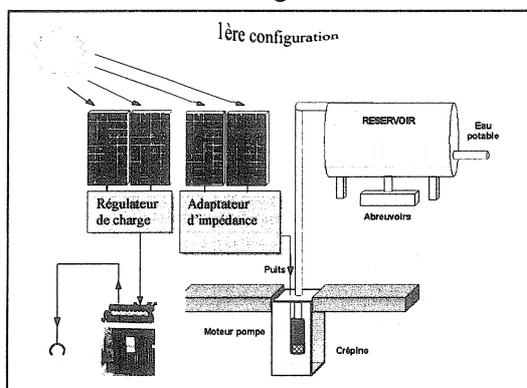
nécessaire à l'éclairage doit être stockée dans des batteries et disponible sous une tension de 24V continue.



**Architecture de l'installation.**

Configuration en fonction des conditions atmosphériques.

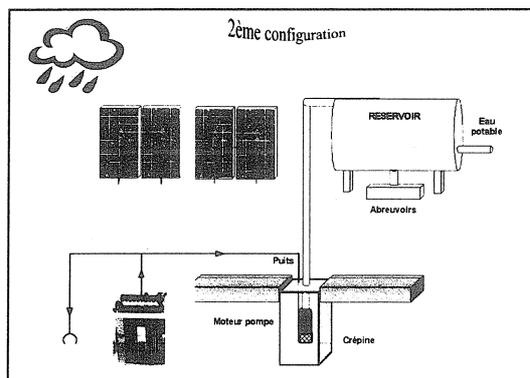
Fig. 1



Dans la 1<sup>ère</sup> configuration,

- 2 modules alimentent 2 batteries de stockage par l'intermédiaire du régulateur de charge, ces batteries sont raccordées à des récepteurs 24V.
- 2 modules alimentent la motopompe par l'intermédiaire de l'adaptateur d'impédance.

Fig. 2



Dans la 2<sup>ème</sup> configuration la pompe et les récepteurs sont alimentés par les batteries.

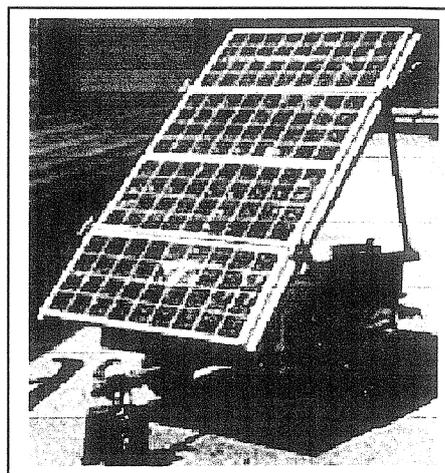
Caractéristiques des équipements retenus

La remorque photovoltaïque, une unité de production autonome

Caractéristiques techniques du Générateur Photovoltaïque mobile.

Selon la préconisation du constructeur cette remorque photovoltaïque permet d'alimenter de mars à septembre dans le sud de la France :

- 4 lampes fluorescentes 18W pendant 3h;
- 1 radio 15W pendant 6h;
- 1 Téléviseur de 55W pendant 3 heures;



Type de module photovoltaïque :

Polycristallin – Bi-verre – 49 W

Tension nominale: 24V continu

Puissance totale : 192 Wcrête

Gestion de l'énergie :

Régulation électronique 24V/ 10A

Type d'accumulateur:

Stationnaire Plomb ouvert plaques Planes

Capacité : 24V 210Ah C100

Inclinaison des panneaux :

Fixe ou variable par pas de 15°

Dimensions de la remorque:

L=1710mm l=1220mm h=905mm

Poids total: 198 kg

Prix: 22 000 F

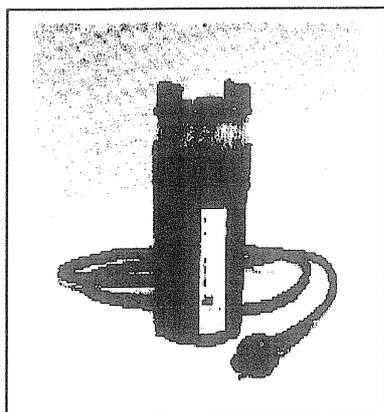
La pompe submersible « Shurflo »

Caractéristiques techniques de la pompe.

Cette pompe est entraînée par un moteur à courant continu à aimants permanents.

Quand le moteur est alimenté sous une tension de 24V continue la pompe débite :

- ↳ 443 l/h pour une hauteur d'élévation de 6m
- ↳ 310 l/h pour une hauteur de 70m



Remarque :  
d'autres types de pompes peuvent être utilisés ce qui entraîne, par la suite, d'autres choix technologiques.

Marque : Shurflo - Modèle : 9300  
Tension nominale  $U_n = 24 \text{ V}$  continue  
Courant  $I = 4 \text{ A}$  max  
Puissance absorbée maximale  $P_{aM} = 96 \text{ W}$ .  
Puissance absorbée minimale  $P_{am} = 22 \text{ W}$ .  
Levage vertical maximal : 70m.

**Limite de la présentation.**

Pomper l'eau « au fil du soleil ».

On se limite dans cet article à la mise en équations et aux essais relatifs à la fonction « Pomper de l'eau au fil du soleil », c'est à dire réaliser l'adaptateur d'impédance pour travailler constamment à la puissance maximum des panneaux.

La structure de l'installation dans ce cas est la suivante ( Fig. 3 ) :

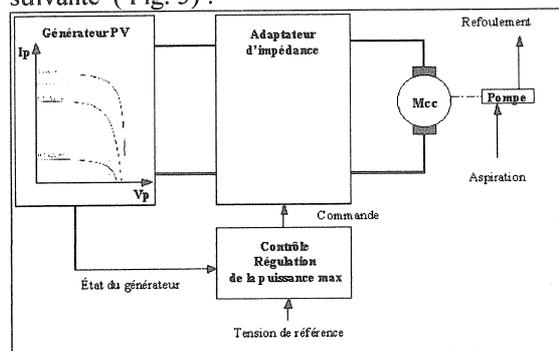


Fig. 3

Aucune puissance maximale absolue ou nominale ne peut être définie pour un dispositif photovoltaïque en raison de la dépendance des conditions de gisement solaire offertes par le site d'installation.

On définit la puissance crête  $P_c$ , puissance maximale relative délivrée par le générateur soumis à un éclaircissement de  $1000 \text{ W/m}^2$  de spectre AM0 à une température de  $300^\circ\text{K}$ .

Pour que le générateur fonctionne à son maximum de puissance, il faut que la caractéristique du moteur, vu du générateur PV, passe par le point

fonctionnement à puissance maximale quel que soit l'éclaircissement.

Sur la figure 4 sont tracées :

- la caractéristique électrique  $I_p = f(V_p)$  du générateur photovoltaïque  
 $I_p$ , courant débité par le panneau  
 $V_p$ , tension aux bornes du panneau
- la caractéristique électrique du moteur de pompe  $I_{mo} = f(V_{mo})$ .  
 $I_{mo}$ , courant dans le moteur de la pompe  
 $V_{mo}$ , tension aux bornes du moteur.
- La caractéristique de puissance  $P_p = g(V_p)$  du générateur.  
 $P_p$ , puissance débité par le panneau  
 $V_p$ , tension aux bornes du panneau.

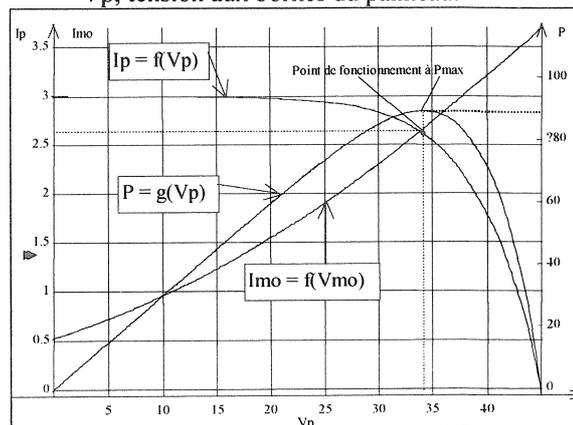


Fig. 4

Dans le cas de la figure 4, le moteur est directement alimenté par le panneau et le point de fonctionnement correspond au maximum de puissance du générateur.

**Essais préalables des panneaux.**

Relevés des caractéristiques électriques du panneau solaire pour différents éclaircissements.

Le panneau alimente une résistance variable et on relève  $I_p$  (courant débité par le panneau) en fonction de  $V_p$  (tension aux bornes du panneau).

Tracé des courbes.

Caractéristiques  $I_p = f(V_p)$  pour différents éclaircissements

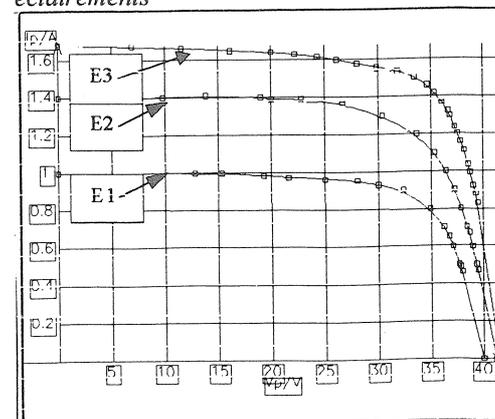


Fig. 5

Caractéristiques  $P_p = g(V_p)$  pour les mêmes éclairagements.

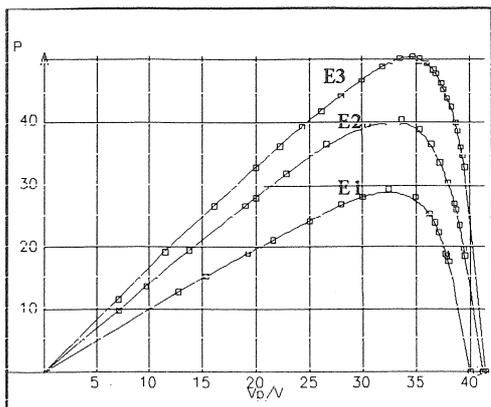


Fig. 6

Essais préalables de la motopompe.

Caractéristiques électriques de la motopompe pour différentes hauteurs de pompage.

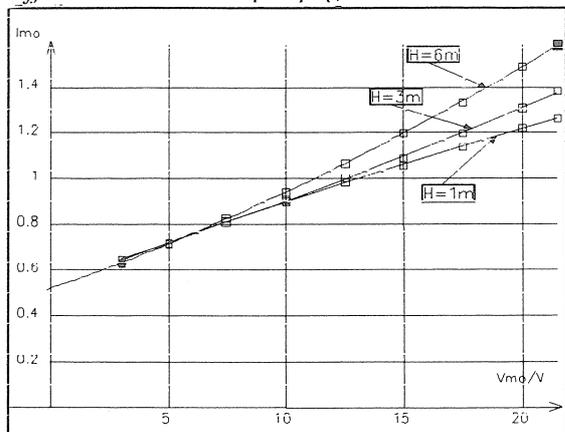


Fig7

Caractéristique du courant et de la puissance en fonction de la tension aux bornes du moteur de la pompe pour une hauteur de 6 mètres.

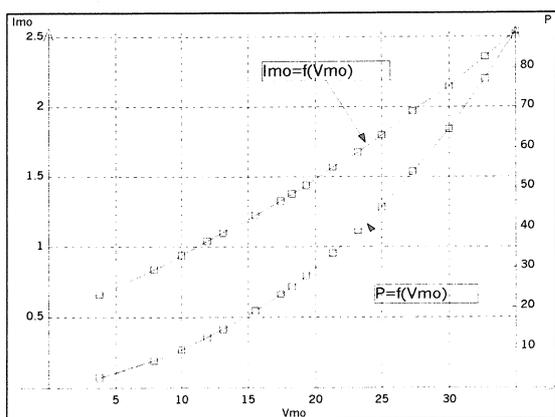


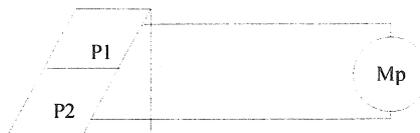
Fig. 8

La modélisation de la courbe  $I_{mo}=f(V_{mo})$  a donné l'équation suivante :

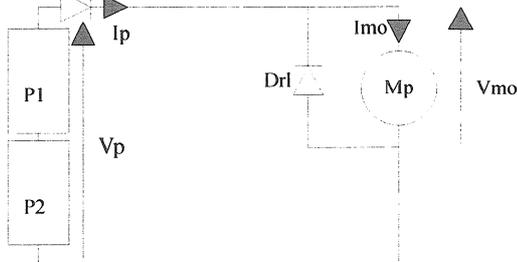
$$I_{mo} = 0.5 + 0.037V_{mo} + 0.0006V_{mo}^2$$

Moteur de la pompe directement alimenté par le panneau

Montage



Schéma



Mise en équations

Equations des panneaux

$$I_p = f(V_p)$$

$$P_p = V_p \cdot I_p$$

Equations du moteur de pompe pour  $h=6m$

$$I_{mo} = 0.5 + 0.037V_{mo} + 0.0006V_{mo}^2$$

Point de fonctionnement électrique

Le point de fonctionnement électrique est le point d'intersection des 2 courbes

$$I_p = f(V_p) \text{ et } I_{mo} = f(V_{mo}) \text{ (Voir fig4)}$$

Puissances mises en jeu

$$P_m = V_{mo} \cdot I_{mo} = V_p \cdot I_p = P_p$$

Le graphe de la figure 9 montre la puissance fournie par le panneau et donc absorbée par le moteur en fonction de l'éclaircement.

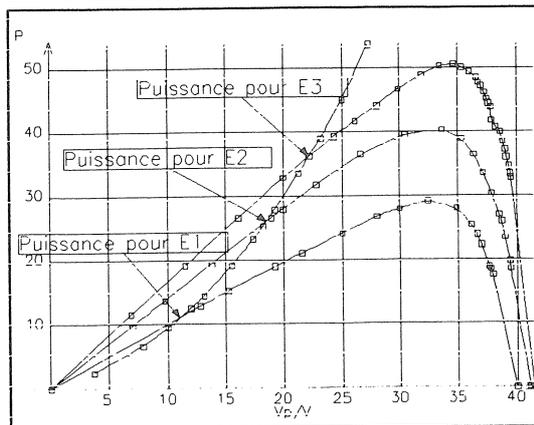


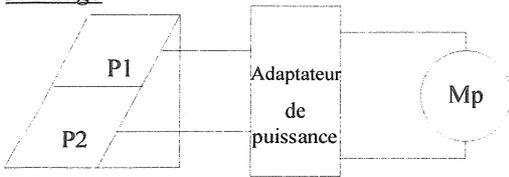
Fig. 9

Conclusions

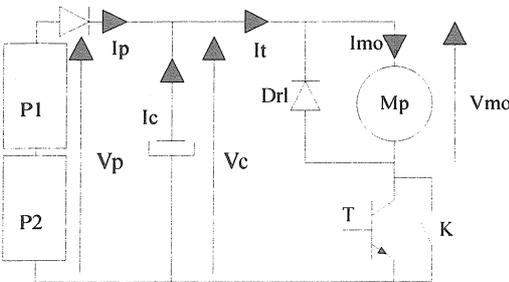
Pour les 3 éclairagements E1, E2 et E3 la puissance de fonctionnement n'est pas la puissance maximale que peut délivrer le panneau (voir ci-dessus).

**Moteur de la pompe alimenté par l'intermédiaire de l'adaptateur d'impédance**

Montage



Schéma



Mise en équations.

Soit :

- ix(t) valeur instantanée du courant indice X
- Ix valeur moyenne du courant indice X
- vx(t) valeur instantanée de la tension indice X
- Vx valeur moyenne de la tension indice X
- $\alpha$  rapport cyclique du hacheur

Equations des panneaux :

$$\begin{aligned} ip(t) &= I_p \\ I_p &= f(V_p) \\ I_p &= \alpha \cdot I_{mo} \\ P_p &= V_p \cdot I_p \end{aligned}$$

Equations du condensateur :

$$\begin{aligned} ic(t) &= it(t) - ip(t) \\ vc(t) &= vp(t) = V_p \\ I_c &= 0, \text{ la valeur moyenne du courant } ic(t) \text{ est nulle} \\ P_c &= V_c \cdot I_c = 0, \text{ la puissance du condensateur C est nulle.} \end{aligned}$$

Le condensateur C permet de filtrer la tension, il transforme la source de courant en une source de tension.

On suppose que toute l'ondulation du courant circule dans le condensateur, on en déduit:

$$ip(t) = I_p = I_t = \alpha \cdot I_{mo}$$

Equations du moteur de pompe

$$\begin{aligned} I_{mo} &= a + b \cdot V_{mo} + c \cdot V_{mo}^2 \\ (\text{pour une hauteur manométrique de } 6m) \\ a &= 0.5, b = 0.037, c = 0.0006 \\ I_{mo} &= I_t / \alpha = I_p / \alpha \\ V_{mo} &= \alpha \cdot V_c = \alpha \cdot V_p \end{aligned}$$

Equations de la charge vue des bornes du panneaux

$$I_{pa} = \alpha \cdot I_{mo} = \alpha \cdot (a + b \cdot V_{mo} + c \cdot V_{mo}^2)$$

$$\begin{aligned} I_{pa} &= \alpha \cdot (a + b \cdot \alpha \cdot V_p + c \cdot \alpha^2 \cdot V_p^2) \\ I_{pa} &= \alpha \cdot a + b \cdot \alpha^2 \cdot V_p + c \cdot \alpha^3 \cdot V_p^2 \end{aligned}$$

Il est possible de tracer  $I_{pa} = h(V_p)$  pour différentes valeurs de  $\alpha$ .

Point de fonctionnement électrique au niveau du panneau.

Le point de fonctionnement électrique est : le point d'intersection de  $I_p = f(V_p)$  du générateur et de  $I_{pa} = h(V_p)$  de la charge. Ce point de fonctionnement se déplace en fonction de  $\alpha$ . (voir graphe fig10)

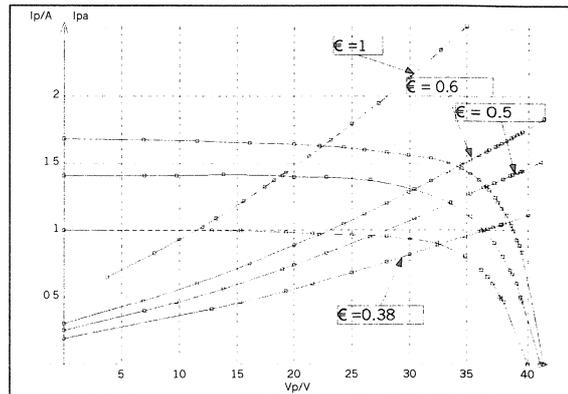


Fig. 10

Puissances mises en jeu

$P_m = V_{mo} \cdot I_{mo} = V_p \cdot I_p = P_p$   
 Les puissances sont toujours égales quel que soit  $\alpha$ , mais il est possible de moduler la puissance avec  $\alpha$ .  
 Il est possible d'obtenir la puissance maximale du panneau donc la puissance optimale du moteur. La puissance maximale du panneau est obtenue pour la valeur de  $V_p = V_{popt}$  qui annule la dérivée de  
 $P_p = V_p \cdot I_p = V_p \cdot f(V_p) = g(V_p)$ .  
 $P_p' = g'(V_{popt}) = 0$ , soit  $I_{popt} = f(V_{popt})$

On peut déterminer  $\alpha_{opt}$ , tel que  
 $I_{popt} = \alpha_{opt} \cdot a + b \cdot \alpha_{opt}^2 \cdot V_{popt} + c \cdot \alpha_{opt}^3 \cdot V_{popt}^2$

Avantage de l'introduction d'un hacheur dans le montage :

la variation de  $\alpha$  permet de faire varier la puissance. Il est possible d'obtenir la puissance maximale débitée par les panneaux donc reçue par le moteur. La fig 11 montre :

- ↪ la caractéristique de puissance fournie par le panneau ;
- ↪ la caractéristique de puissance demandée par la pompe pour différentes valeurs de  $\alpha$  ;
- ↪ la valeur de  $\alpha$  qui permet d'obtenir la puissance max du panneau.

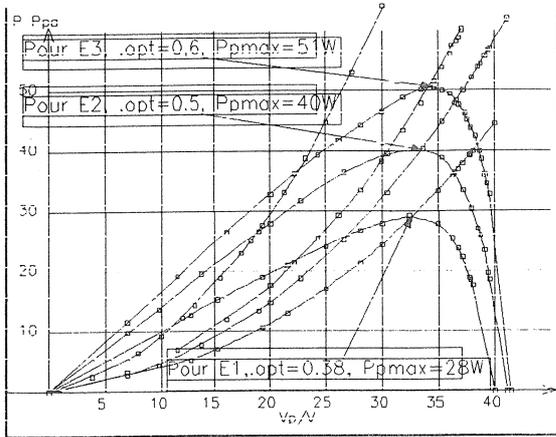


Fig. 11

La fig12 montre les points de fonctionnement électrique avec ou sans le hacheur :

- ↳ Pt A, point de fonctionnement sans le hacheur;
- ↳ Pt B, point de fonctionnement, vu du moteur, avec le hacheur;
- ↳ Pt C, point de fonctionnement, vu du générateur Photovoltaïque, avec le hacheur.

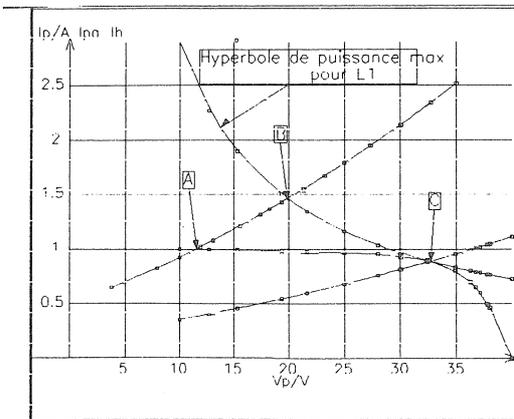


Fig. 12

**Conclusion**

Les essais montrent que dans le cas des essais effectués, la puissance maximale des panneaux Ppmax est obtenue pour une tension optimale Vpopt.

Pour l'éclairement E1, Vpopt = 32.4V

Pour l'éclairement E2, Vpopt = 33.5V

Pour l'éclairement E3, Vpopt = 34.6V

D'une façon générale pour différents essais effectués dans différentes conditions Vopt est compris entre 30V et 35V.

**Elaboration d'un adaptateur d'impédance :**

**Hypothèses retenues.**

Compte-tenu des deux configurations de fonctionnement, des caractéristiques de la pompe et de la remorque, nous avons retenu un adaptateur d'impédance constitué d'un filtre capacitif et d'un hacheur série. Le condensateur sert à maintenir une tension continue, le hacheur permet de faire varier l'impédance de la charge vue du Générateur Photovoltaïque.

A partir des essais expérimentaux la puissance maximale est obtenue pour une tension aux bornes

du panneau comprise entre 30V et 35V. De plus si l'éclairement augmente la valeur de la tension augmente, il faut donc corriger la tension de consigne en fonction de l'éclairement c'est à dire en fonction du courant débité par le panneau.

Il suffit donc de réguler la tension aux bornes du panneau Vp à 28 V et de corriger la consigne en fonction de Ip.

La modélisation de la caractéristique Vpopt en fonction de Iopt est la suivante :

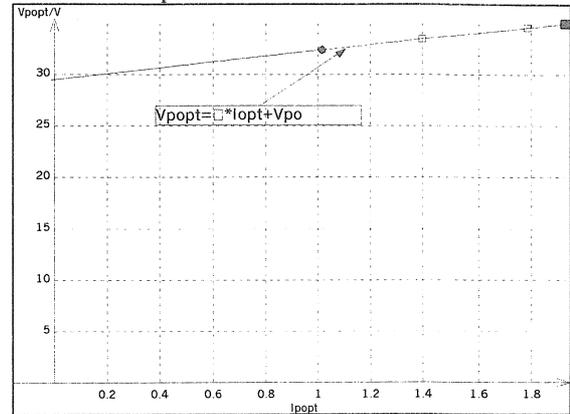
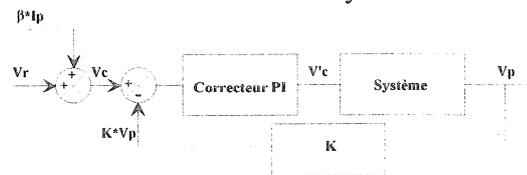


Fig.13

$$V_{popt} = \beta \times I_{popt} + V_{po}$$

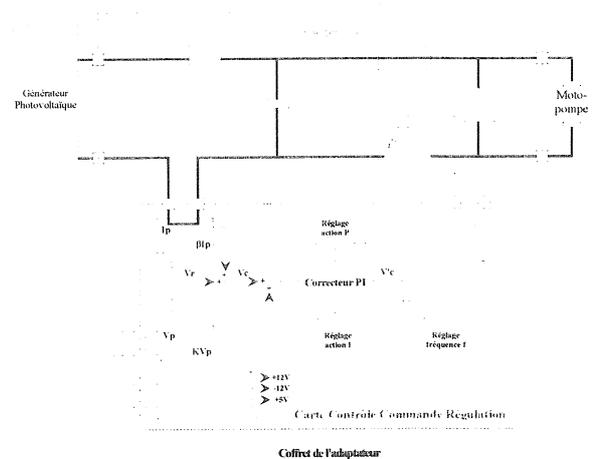
Dans l'application Vpo=29.5V et  $\beta = 2.85V/A$

**Schéma bloc du système**



Le schéma bloc fonctionnel fait apparaître la correction de la consigne en fonction du courant Ip, c'est à dire en fonction de l'éclairement du panneau.

**Schéma synoptique de l'adaptateur**



Le schéma synoptique complet de l'adaptateur d'impédance est constitué de deux parties qui sont détaillées ci-dessous.

*La partie puissance*

Le hacheur est réalisé par un transistor Darlington BDX33 commandé par un générateur d'impulsions calibré LM3524.

Un fusible de protection est en série avec le moteur.

*La partie contrôle commande régulation*

Un pont diviseur permet la mesure de la tension du panneau et un capteur de courant, du type LEM LA55P, réalise la mesure du courant débité par le panneau.

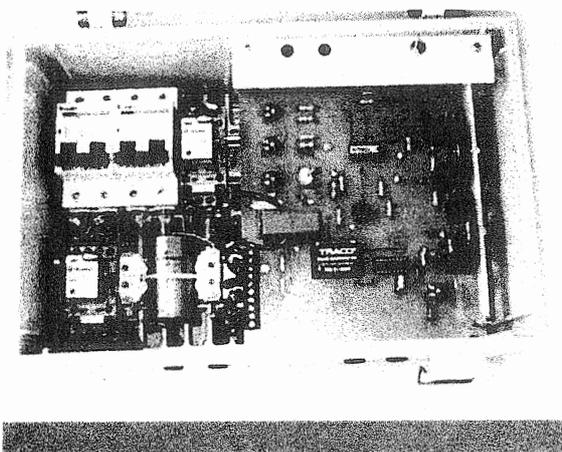
Le comparateur et le correcteur de type PI sont mis en oeuvre avec des amplificateurs opérationnels.

L'alimentation de la carte contrôle commande est réalisée par un convertisseur DC/DC.

*Remarque :*

Ce schéma synoptique ne fait pas apparaître toutes les fonctionnalités du système réalisé.

Photo du prototype



**Conclusion.**

Le système réalisé est un prototype qui n'a pas la prétention de répondre à toutes les situations d'utilisation.

Il montre une solution pour réaliser un adaptateur d'impédance appelé aussi optimisateur (système qui permet une adaptation optimale ou un transfert optimal de l'énergie entre les panneaux et le récepteur).

La plupart des optimisateurs du marché utilisent des convertisseurs de tension abaisseurs de tension avec la fonction MPPT (Maximum Power Point Tracker) On peut donc différencier deux modes de fonctionnement :

**le mode appelé Booster** utilisé pour un démarrage de la pompe dans un cas d'ensoleillement minimum;

*(ce mode est très pratique et suffisant dans des zones où l'éclairage ne pose pas de problème);*

**le mode appelé MPPT** utilisé pour assurer un transfert optimal de l'énergie entre les panneaux et le récepteur;

*(ce mode est très utilisé en Allemagne où la recherche du meilleur rendement est une grande préoccupation).*

Il peut se développer sur le thème de l'énergie solaire des activités en Essais de Systèmes et en Technologie Schéma Fabrication, comme :

- ↳ le dimensionnement d'une installation PV, l'étude, l'essai et la réalisation d'un régulateur de charge de batteries;
- ↳ une étude comparative sur le stockage et la transformation de l'énergie ...

## CUISINE AU BIOGAZ ET AU SOLEIL : EXPERIMENTATION ET ADAPTATION AUX REALITES TROPICALES.

Hervé RICARD

Lycée Clément Ader, 37 bis rue Robert Schuman, 91200, Athis-Mons

*Résumé : Dans le cadre de la création de modes de développements durables, il est important de proposer des projets dont l'objectif est d'améliorer la qualité de vie des communautés plutôt que d'être considérés comme des interventions strictement techniques. Ainsi, les projets durables de développement dans le domaine de l'énergie domestique doivent nécessairement prendre en compte, sous peine d'échecs, les aspects environnementaux (déforestation,...), la santé des populations, l'économie familiale et locale, sans oublier le facteur culturel d'assimilation de ces nouvelles technologies. Dans cette optique, nous présentons deux réalisations simples et bon marché de cuisiseurs, l'un fonctionnant au biogaz, l'autre à l'énergie solaire. Après avoir exposé les modes de fabrication et d'utilisation, nous présentons un essai d'implantation en milieu tropical : la ferme école Songhai au Bénin.*

### I. Cuisine au biogaz :

#### I.1 Introduction :

« Je t'accorde de la bouse de bœuf, tu feras ton pain dessus » (Ezéchiel, 4-15). Cette phrase prophétique, biblique est au coeur même des questions du XXI<sup>ème</sup> siècle qui « assistera peut-être à ce miracle : le déchet systématiquement promu au rang de matière première noble, valorisé, une perspective pour les pays développés, un mirage pour les mégalo-poles du Sud »<sup>(1)</sup>. A ce titre, le biogaz, issu des déchets indique sa provenance par son préfixe *bio* (vivant) : les matières organiques libèrent le biogaz lors de leur décomposition selon un processus de fermentation. Si celle-ci se déroule en présence d'air, on l'appelle *aérobie* (exemple : le compostage), en l'absence d'oxygène, la fermentation est dite *anaérobie* ; elle met alors en jeu des bactéries qui vont produire du méthane (CH<sub>4</sub>), du gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) et de l'hydrogène sulfuré (H<sub>2</sub>S) responsable des mauvaises odeurs. On parle alors de *méthanisation*.

Tous les endroits où sont stockés des déchets organiques (décharges d'ordures ménagères, station d'épuration des eaux, centres d'élevage bovin, porcin,..., centres d'équitation) produisent naturellement du biogaz. Celui-ci gagne les hautes couches de l'atmosphère et participe, par *effet de serre*, au réchauffement de la planète. D'où l'importance qu'il faut accorder à sa valorisation, à la fois comme action dépolluante et génératrice d'énergie. Il devient alors 20 fois moins polluant, brûlé, que s'il est laissé en liberté dans l'atmosphère.

L'ADEME (Agence pour la Défense Et la Maîtrise de l'Energie) et Gaz de France, dans le cadre de la gestion des déchets, commence à s'intéresser à cette ressource énergétique<sup>(2)</sup>. Pour notre part, dans le cadre d'un projet éducatif de sensibilisation à la valorisation énergétique du biogaz, en liaison avec la Maison de la Nature d'Athis-Mons (Essonne), nous avons développé, de manière artisanale, une petite unité de production de biogaz et son utilisation en cuisine. En dehors de son aspect didactique, elle peut réellement être utilisée dans des villages de pays en voie de développement.

#### I.2 Construction et fonctionnement des unités de production :

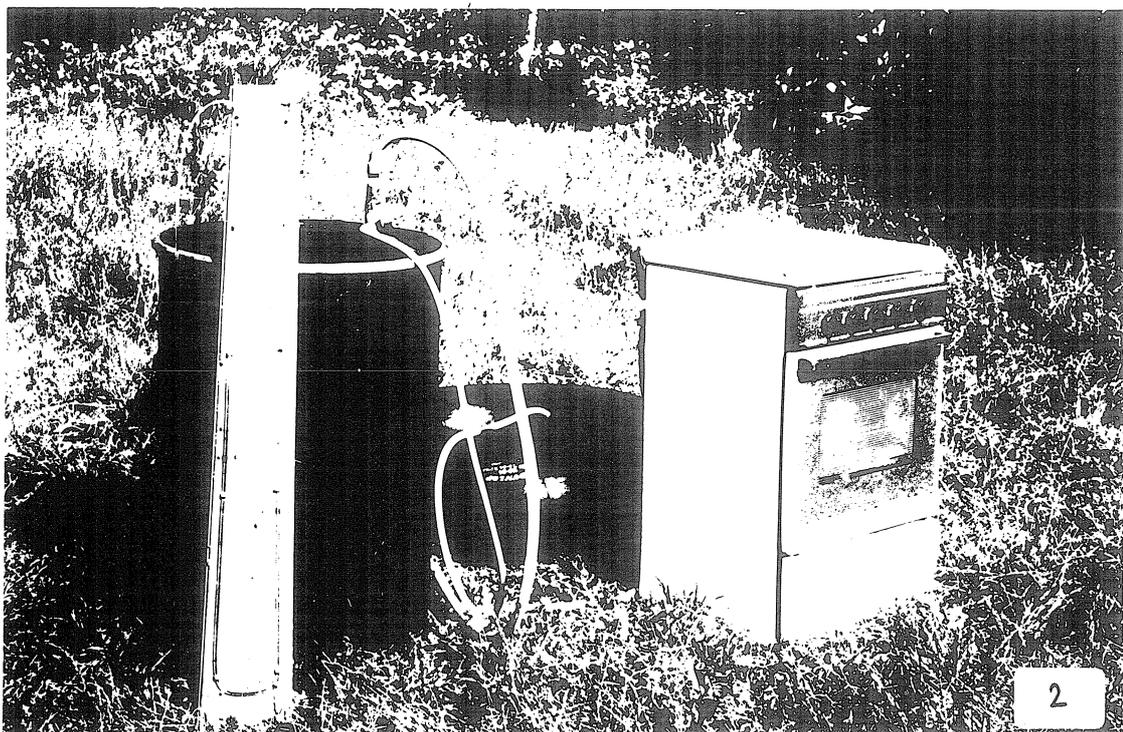
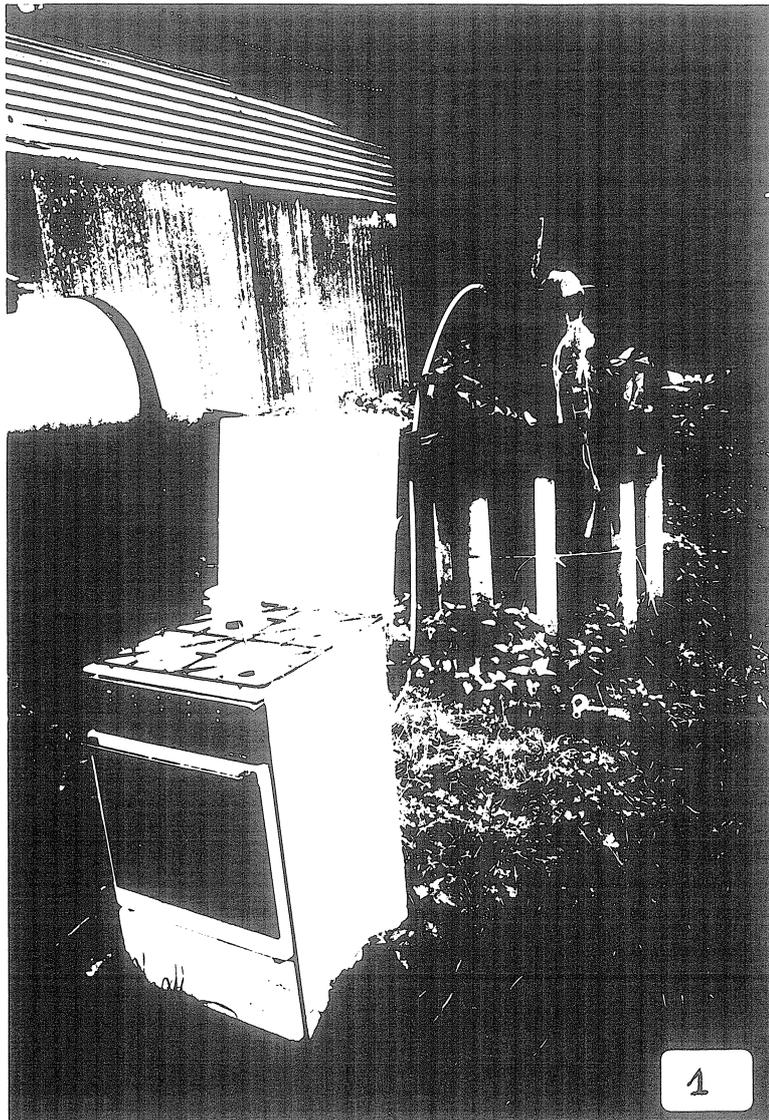
Nous nous sommes inspirés des brochures sur le biogaz<sup>(3), (4)</sup> éditées par l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) et destinées aux villageois des pays en voie de développement. Le lieu d'expérimentation est à Gen tray (Deux-Sèvres) dans la ferme de M. André Ricard. La période d'essai s'est échelonnée de juillet à octobre 1999.

**1<sup>ère</sup> structure<sup>(3)</sup> :** (photo n°1) L'enceinte qui reçoit le mélange d'eau, de fumier animal (vaches) et débris végétaux est constituée de poteaux (blancs sur la photo) réunis par du fil de fer barbelé et tapissée à l'intérieur d'une bâche de plastique noire. Deux mois avant d'utiliser l'unité de production, on a préparé, en petite quantité, un mélange de fumier de vache et d'eau qui sert de mélange de démarrage pour pouvoir amorcer la réaction et obtenir plus vite du biogaz. Une fois le mélange et le catalyseur introduits dans l'enceinte, on y enfonce un baril de pétrole, à l'envers, jusqu'à ce qu'il touche le fond. Une valve y est fixée sur le dessus, reliée à un tuyau, fixé lui-même à une gazinière. Au bout de 15 jours à 3 semaines, le fut est remonté complètement puis a été régulièrement rempli une fois tous les 3 jours environ, dépendant évidemment de la chaleur du jour. Les 2 ou 3 premiers contenus n'étaient pas inflammables puis par la suite, une fois tous les 3 jours, M. André Ricard pendant plus de 30 minutes, sous l'œil un peu étonné du voisinage, a pu se confectionner quelques délicieuses soupes dont il a le secret. Pour augmenter la capacité de stockage dans le baril, une branche a été fixée à un bout de bois d'un côté et à un fil de l'autre côté, lui-même fixé à un poteau métallique (à terre sur la photo) par

l'intermédiaire d'un treuil. La production régulière de juillet à septembre a commencé à ralentir vers le mois d'octobre, d'une part par épuisement naturel, d'autre part par abaissement de la température extérieure.

### 2<sup>ème</sup> structure <sup>(4)</sup> : (photo n°2)

Un baril de 200 litres, hermétiquement clos, contient le mélange. Il est peint en noir pour y augmenter la température. Le biogaz produit est stocké dans une chambre à air de camion, qui permet d'avoir ainsi une pression importante. Celle-ci est mesurée par un manomètre, tuyau de plastique en U qui contient un liquide coloré (pas encore connecté au baril sur la photo). Il permet de mesurer la pression et d'apprécier la quantité de biogaz disponible. Il constitue de plus un système de sécurité : s'il y a trop de gaz, celui-ci s'échappe par l'entonnoir utilisé comme vase d'expansion (une surpression peut provoquer une hernie à la chambre à air). Pour cette structure, il est nécessaire de relier le baril à la gazinière par l'intermédiaire d'un détendeur. Par rapport à la précédente structure, ce système offre le gros avantage d'être sans odeur.



Cette 2<sup>ème</sup> structure est en cours d'optimisation.

### I.3 Le Biogaz à la ferme école Songhai (Bénin) :

Cette technique s'inscrit dans un système intégré de production-formation

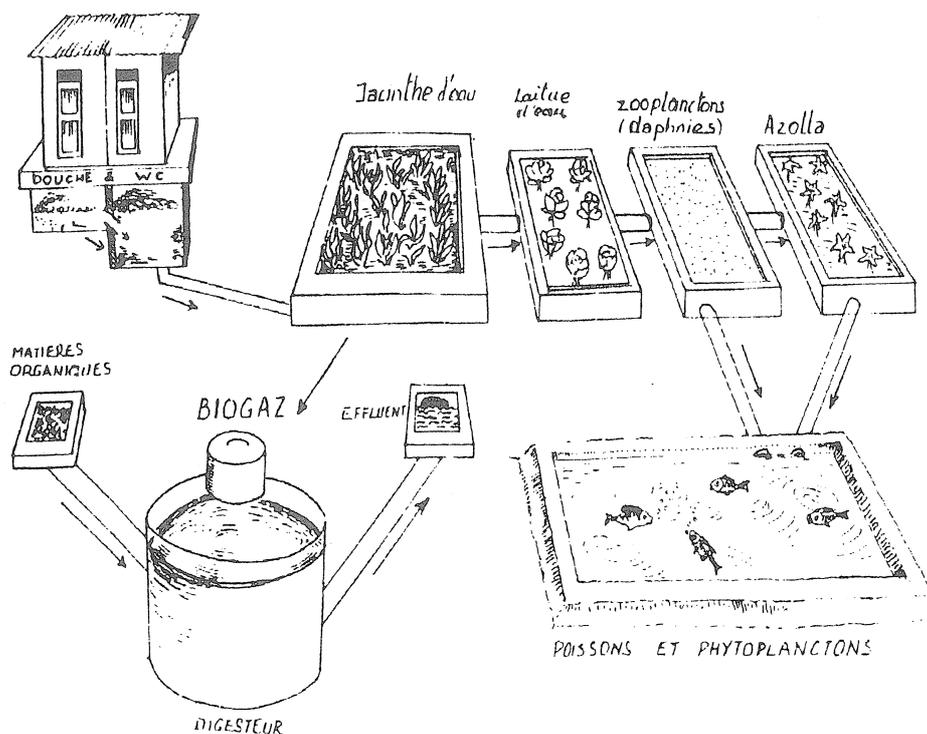
#### a) Présentation de la ferme école :

Il s'agit d'un centre de formation production, recherche et développement en agriculture durable dont le but est « d'élever le niveau de vie des populations locales, en partenariat avec tous les autres acteurs du développement »<sup>(5)</sup>. La philosophie Songhai, nom d'un empire prestigieux du Niger au XV<sup>ème</sup> siècle est la suivante : « l'homme doit se rendre acteur de son développement dans le respect de la nature humaine et de l'environnement. Il répond à une mission dans laquelle il s'engage avec les dimensions matérielles et spirituelles (valeurs humaines) qui le constituent. L'homme engagé dans le développement est solidaire, il voit la nécessité de se valoriser, mais il est convaincu qu'il doit respecter le Bien Commun pour y arriver, et qu'aucun développement harmonisé durable n'est possible sans que la majorité des gens n'aient les conditions minimales pour y parvenir. Il voit la nécessité et le devoir de créer des conditions favorables à l'épanouissement et à la valorisation de tous »<sup>(5)</sup>.

La ferme consiste en un système agro-biologique dit intégré ou éco-système ; il y a interactions, par recyclage et revalorisation des énergie perdues entre les trois pôles Agriculture/Elevage/Pisciculture. Il y a d'autre part interaction ou synergie entre l'éducatif et le productif, indissociablement liés. L'ensemble constitue un système performant ou la formation n'est plus un coût comme dans nos sociétés puisque les élèves sont des maillons de la chaîne de production et d'autre part, le coût de production est abaissé puisque les élèves (nourris et logés dans la ferme) sont « rétribués » par une formation solide et diversifiée. Les intrants de ce système sont minimisés puisque tout fonctionne par interaction interne (« multiple feedback loop system») : concept du « low input production system ». Le système Songhai est productif tant par la création de richesses matérielles que par l'émergence chez les apprenants d'un état d'esprit novateur qui pourrait bien changer la face de l'Afrique et en faire le continent phare du siècle prochain.

#### b) Le système de production de biogaz à Songhai :

Il est intégré au système d'épuration verte qui peut être représenté par le schéma suivant<sup>(6)</sup> :



L'utilisation des plantes aquatiques (jacinthes d'eau, laitues d'eau...) présente le double avantage suivant : d'une part, leur culture constitue un système d'épuration verte des eaux usées et un recyclage des éléments nutritifs de ces eaux par l'énergie solaire. d'autre part, les jacinthes d'eau constituent une source de biométhane<sup>(7)</sup> qui peut être réintroduite dans le digesteur (enceinte de formation du biogaz). On remplit le digesteur de déjections animales (lisier de porc, fientes de volailles...) et autres matières organiques (herbes coupées...). A Songhai, en dehors de son caractère didactique de faisabilité comme élément d'un système intégré agro-biologique, le biogaz est connecté à des brûleurs et utilisé en cuisine. Le digesteur utilisé est de type chinois<sup>(6)</sup> et suppose une maîtrise technique qui est difficilement transposable dans le village de brousse. C'est pourquoi, hormis Songhai, ce genre de production n'est pratiquement pas implantée en Afrique. Il faut croire que le problème n'est pas seulement technique puisque dans bon nombre de pays d'Asie (Inde, Chine...), le biogaz est couramment employé dans les campagnes. Des structures du style de celles de la photo n°1, techniquement simples et bon marché, semblent les plus transposables mais leur acceptation par les populations reste encore à démontrer. Notons que l'énergie calorifique issue du biogaz peut aussi être exploitée pour alimenter des sources d'éclairages (lampes à gaz) ou des moteurs thermiques<sup>(8)</sup>.

## II. Les cuiseurs solaires :

### II.1 Introduction :

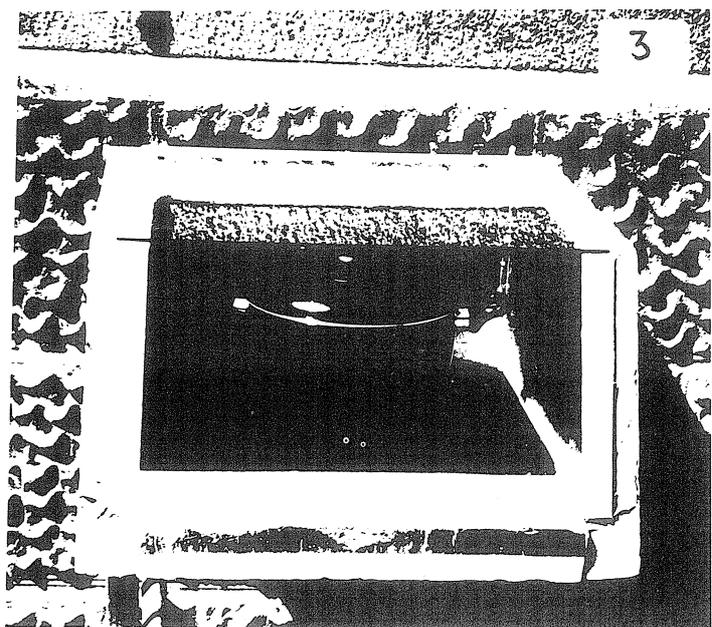
Selon M. Roger Bernard, spécialiste de la question<sup>(9)</sup> : « Lorsqu'on commence à simplifier sa vie (la rendre plus écologique), toutes sortes de synergies merveilleuses se mettent en place, et cela au niveau de l'environnement, de la santé, des finances, de la solidarité internationale, de l'organisation de la vie ». au niveau de l'environnement, « en diminuant la consommation d'énergie, nous amenons une contribution décisive à la création de modes de développement durables, indispensables si on veut permettre à l'humanité de survivre ». D'autre part, en diminuant l'utilisation d'aliments gras, frits, la cuisine solaire permet de ménager sa santé. Ensuite, l'impact financier de ce mode de cuisson est évident. Enfin, « l'imitation du mode de vie des 20% les plus aisés par les 80% moins fortunés mettrait en danger l'équilibre écologique de tous, toute modération dans la consommation d'énergie a un impact positif sur l'environnement ».

On peut classer les cuiseurs solaires en quatre familles : 1) les paraboles (le four solaire de Mont-Louis dans les Pyrénées), 2) les cuiseurs à chauffage indirect (le soleil chauffe des tubes métalliques noirs contenant de l'eau et la vapeur produite chauffe un récipient), 3) les cuiseurs « panels » (voir<sup>(8)</sup>), 4) les boîtes vitrées : c'est de ces dernières dont nous allons parler.

### II.2 Constitution et fabrication du cuiseur solaire (photo n°3) :

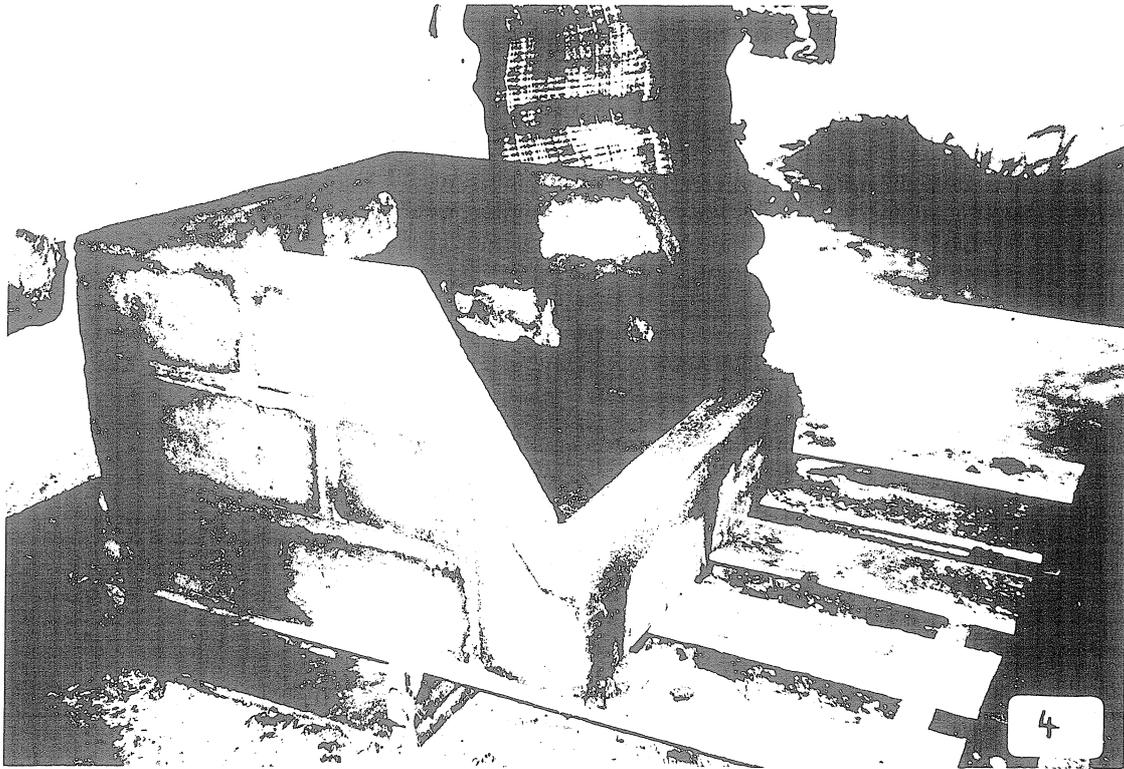
Nous nous sommes procurés ce cuiseur dans l'entreprise S.A.R.L. « Four Solaire Développement » localisée à Mont-Louis. La boîte est constituée de panneaux isolants en polyuréthane recouverts de papier aluminium. Ce papier sur les parois internes de la boîte servira à réfléchir les rayons du soleil sur la casserole. Une plaque métallique peinte en noire tapisse le fond de la boîte. Elle est isolée du fond par une plaque de mica expansé ou vermiculite. Deux plaques de verre ferment la boîte, l'une servant de couvercle, l'autre de panneau frontal. Sous les rayons du soleil, la température à l'intérieur de la boîte va s'élever selon les deux effets cumulés suivant : *effet de serre* et *rayonnement du corps noir*. La casserole de couleur noire et reposant, de plus, parfaitement sur la plaque métallique permet d'augmenter encore plus la température à l'intérieur de la casserole. Dans le Sud de la France et même plus au Nord, la température peut atteindre jusqu'à 150°C. L'eau peut donc bouillir à l'intérieur de la casserole et ceci donne la possibilité de cuisiner beaucoup de type d'aliments. L'ingénieur de l'entreprise,

M. Eudeline certifie y préparer de délicieux poulets ratatouille.



### II.3 Implantation et adaptation du cuiseur solaire en milieu tropical :

M. Eudeline nous a gracieusement fourni un cuiseur solaire (du type de la photo n°3) en kit et nous sommes partis faire les essais dans la ferme Songhai du 14 août au 28 août 1999. Malheureusement, le temps, n'a pas permis de faire des essais concluants, par contre nous avons développé, avec l'aide d'animateurs de Songhai, Mathieu et Raphieu, sous la responsabilité de M. Guy Loueke, un cuiseur solaire, réalisable, dans une optique de développement durable et de non dépendance technologique avec les pays du Nord, avec des matériaux locaux (photo n°4 ci-dessous)



Il s'agit de valoriser la terre latéritique, cette terre rouge omniprésente sur le sol africain que l'on peut récupérer gratuitement. Le coffrage du cuiseur est donc constitué de briques latéritiques qui présentent des qualités d'isolation thermique que ne possède pas le parpaing. Dans l'optique environnementale de combattre la déforestation, elles n'ont pas été cuites mais simplement compactées dans une presse à briques manuelle. Le reste des matériaux, plaque métallique, plaques de verre, sont trouvées sur place et on a reconstitué en fait, dans la forme et dans le principe le four de la photo n°3. Le gros désavantage de cette structure est son poids. Suite aux mauvais temps et au manque de temps, nous n'avons pas procédé à des essais au cours de notre séjour. Mais il a été établi, en liaison avec Songhai, un projet d'implantation de ces cuiseurs dans des villages de fermiers qui ont fait leur formation à Songhai et dans un village de pêcheurs, à proximité de Songhai : le village d'Aguegue.

Les objectifs seraient les suivants :

- fabrication et optimisation d'un cuiseur solaire local
- vulgarisation de son implantation en milieu villageois
- étude de son impact sur l'environnement (déforestation), la santé des populations, l'économie familiale et locale.

La phase de fabrication est terminée. Dans les mois à venir, nous prévoyons la phase d'essai et d'optimisation : le cuiseur peut servir à cuisiner, à rendre de l'eau potable, à stériliser des instruments, à sécher des fruits ou légumes (champignons...) en enlevant la vitre supérieure. Dans les années à venir, il pourrait être intéressant, une fois ce cuiseur implanté et intégré dans le mode de vie des villageois d'étudier son influence sur la déforestation. Nous montrons à la photo n°5 le village d'Aguegue (Sud Bénin) avec ces gigantesques barges de bouts de bois destinés à la cuisine et à la construction. Dans ce cas, il est facile de comptabiliser les flux de bois avant et après implantation des cuiseurs. D'autre part, il a été démontré que les fumées de charbon de bois sont nuisibles à la santé (conjonctivite, maladies pulmonaires...). Il peut donc être intéressant de montrer comment la cuisine au cuiseur améliore la santé des populations. Ce mode de cuisson gratuite devrait aussi permettre des

gains d'argent et relever le niveau de vie des villageois. Enfin, il serait intéressant de voir comment l'économie locale est perturbée (vente de bois...).

L'utilisation du cuiseur suppose un autre type de comportement dans la façon de cuisiner. Il est donc prévu dans le projet d'éditer à l'usage des villageois un guide d'utilisation avec des recettes de cuisine. Enfin si l'appropriation de cet outil est satisfaisante, pourquoi ne pas utiliser cette dynamique (de changement comportemental) pour introduire d'autre mode de cuisson tel que le biogaz, proposé dans une forme techniquement simple. Les deux techniques, cuisine au biogaz et cuisine solaire peuvent être utilisées de manière complémentaire.

En conclusion, un projet comme celui-ci, aussi beau soit-il sur le papier, ne peut fonctionner que si, entre les différents acteurs du projet, par le travail en commun, un **capital confiance** s'est créé. Nous avons « ouvert le compte » lors de notre séjour, créditeur à la fin du séjour. Les modes de développement durables ne le sont qu'au travers de la durabilité des rapport de confiance qui s'établissent entre les hommes au cours du temps. Dans notre cas, il est encore trop tôt pour vraiment dire que quelque chose a été fait.

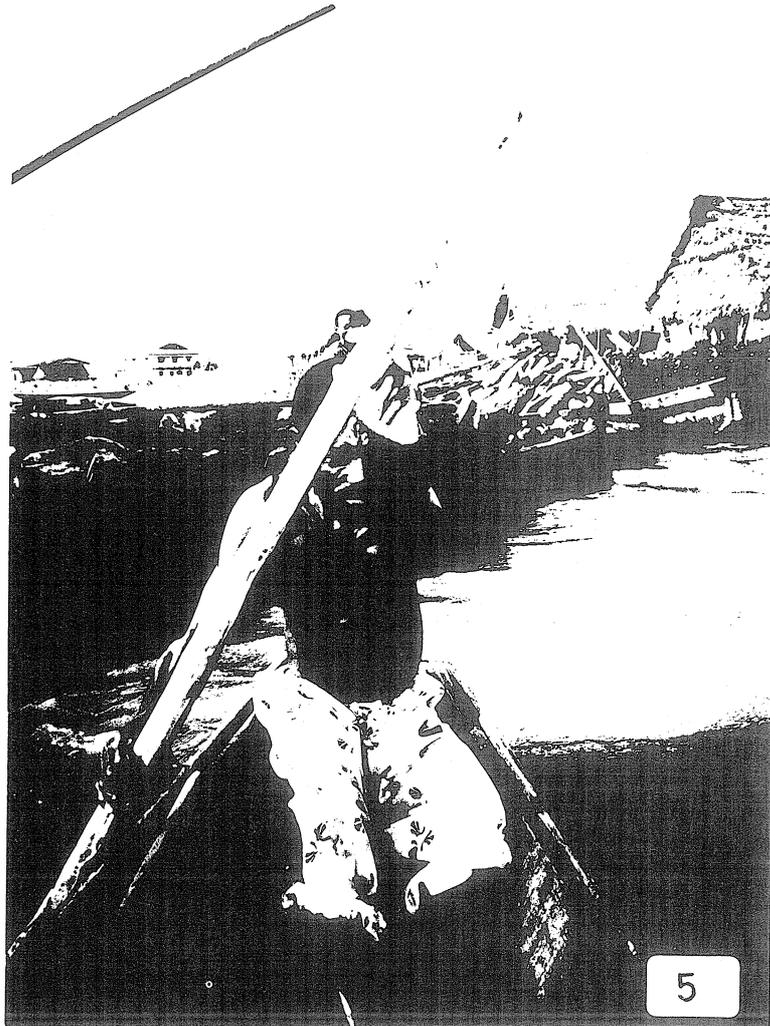
#### Remerciements :

Nous sommes reconnaissants aux personnes suivantes de nous avoir aidés et soutenus :

-M. André Ricard et son fils Yves pour leur participation au projet du biogaz.

-La société « Four Solaire et développement » de Mont-Louis et M. Eudeline, pour nous avoir fourni le cuiseur solaire.

-Le directeur de Songhai, Frère Nzamujo et son équipe, pour leur accueil et leur aide dans la réalisation du cuiseur solaire local.



#### Références :

- (1) : Supplément du Monde du 26/11/99 : 21 questions du XXI<sup>ème</sup> siècle
- (2) : Le biogaz et sa valorisation, guide méthodologique, mars 1999, Ed. ADEME-GDF
- (3) : Le biogaz 1, série FAO, apprentissage agricole, Rome, 1984
- (4) : Le biogaz 2, série FAO, apprentissage agricole, Rome, 1987
- (5) : Plaquette de présentation de la ferme école Songhai
- (6) : Guide pratique : Mise en place et exploitation d'une unité de biogaz, centre Songhai
- (7) : Biométhane 1 : Une alternative crédible, B. Lagrange, 1979, Ed. EDISUD
- (8) : Biométhane 2 : Principes, techniques, utilisations, B. Lagrange, 1980, Ed. EDISUD
- (9) : La cuisson solaire facile, R. Bernard, juin 1999, Ed. Jouvence

## COMMANDE NUMERIQUE DE THYRISTORS.

*La reprise d'une bonne idée.*

**Pierre JOUBERT**

ENS CACHAN, Département EEA,  
61 Avenue du Président WILSON  
94 230 CACHAN

### *Résumé.*

*Une commande de thyristors réagissant sans retard à toute modification de l'angle de commande a été présentée dans le numéro 8 de la revue. Nous décrivons ici une réalisation basée sur le même principe. Notre réalisation utilise un EPLD qui intègre toute la partie logique du montage offrant ainsi une simplification notable de l'implantation matérielle. Cependant le véritable intérêt est la possibilité de programmer ce composant à partir du langage VHDL. On évite ainsi d'avoir à concevoir les détails matériels de la réalisation: le compilateur produisant le fichier de programmation de l'EPLD choisit lui-même les moyens les mieux adaptés pour réaliser les fonctions demandées compte tenu du type de composant retenu*

Nous utilisons depuis de nombreuses années une commande numérique qui a fait ses preuves (250 exemplaires construits !). L'introduction de machines modernes dans nos T.P. a cependant montré son insuffisance. En effet, cette commande ne prend en compte la valeur du retard  $\psi$  qu'une seule fois par période introduisant un retard statistique qui n'est plus compatible avec les constantes de temps très courtes des machines d'aujourd'hui. La commande proposée dans le numéro 8 (Mars 97) de la revue ne présente pas cet inconvénient. Nous avons donc décidé de bâtir une nouvelle commande à partir de l'idée exposée dans cet article. Pour des raisons de simplification de la réalisation nous avons décidé de mettre en œuvre un circuit numérique programmable par l'utilisateur. Le circuit choisi est un CYC372i de CYPRESS. Il comporte 64 bascules. Il est logé dans un boîtier PLCC à 44 broches et comporte 37 entrées/sorties. Bien entendu le contenu de ce circuit sera défini en VHDL et le fichier de programmation sera obtenu à l'aide du compilateur WARP de CYPRESS.

### **1 – Le cahier des charges**

Nous désirions obtenir un montage aussi simple que possible compte tenu de la complexité du schéma choisi. Nous avons donc utilisé une seule tension d'alimentation de 5V. Cette tension est fournie par une alimentation à découpage achetée sous forme de bloc fermé (Radiospares) directement connecté au réseau.

Nous voulions obtenir des trains d'impulsions afin de limiter la dissipation sur les circuits de gâchette des thyristors et surtout réduire la taille des transformateurs de liaison. La longueur des impulsions étant imposée par la taille des transformateurs choisis on imposait du même coup le nombre d'impulsions par séquence de commande. De plus, afin d'être sûrs que la démagnétisation des transformateurs est bien effectuée entre chaque impulsion, nous avons décidé d'utiliser un rapport cyclique plus petit que 0.5.

La séquence de commande la plus courte est obtenue dans le montage P6. Elle correspond à 30° soit 1/12ème de la période. Les transformateurs d'impulsions disponibles (IT253 de Schaffner) ont un produit  $V \cdot t$  de 180 V.μs. La tension disponible étant de 5V, la plus longue impulsion transmissible est de 36 μs. Nous avons choisi de limiter la durée de chaque impulsion à 20 μs. Les considérations précédentes permettent de fixer à 40 impulsions la longueur de la séquence de base. On obtient ainsi 480 impulsions pour une période entière d'où une fréquence d'horloge de 24 kHz pour le compteur.

## 2 – Les différents blocs du montage

### 2.1 – Le générateur de synchronisation :

Le circuit utilisé est le même que celui proposé par le Lycée d'Argenteuil. La différence importante cependant est la faible valeur de la résistance de collecteur du transistor (voir figure 2). Nous avons dû réduire cette résistance car l'impédance d'entrée du circuit numérique est beaucoup plus faible que celle d'une porte CMOS. Ceci est dû à la présence d'une résistance de « pull up » placée aux entrées du circuit intégré pour le rendre compatible avec les bus PCI. Le résultat de cette altération est une acquisition de la synchronisation pour des tensions d'entrée plus élevées. Ici 30 à 50V sont nécessaires pour obtenir une synchronisation précise au passage par zéro. On pourra remarquer également que la partie numérique générant le top de synchronisation du compteur est implanté dans le CYC372. Le circuit mis en œuvre est un circuit combinatoire dont la figure 1 donne le schéma.

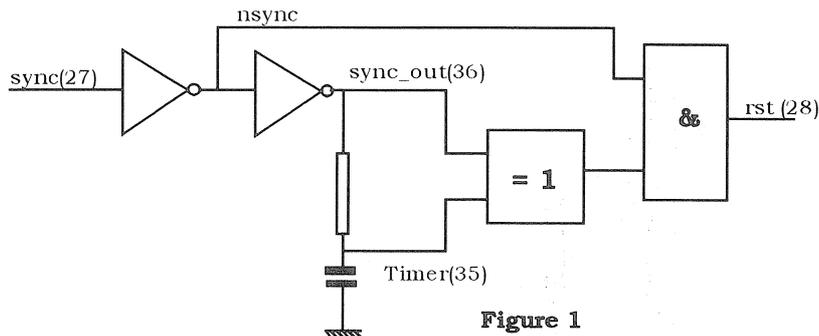


Figure 1

### 2.2 – L'oscillateur d'horloge :

Le montage proposé par le Lycée d'Argenteuil utilisait un quartz. Nous avons pensé qu'un simple oscillateur à base de timer classique (LM555) était suffisant car la fréquence ne nécessite pas une très grande précision la remise à zéro du compteur se faisant à la fin de chaque période. Les valeurs numériques des composants utilisés (figure 2) permettent d'obtenir un rapport cyclique inférieur à 0,5. Cette valeur n'est pas critique.

### 2.3 – L'étage d'entrée du retard $\psi$ :

Le signal d'entrée, image de l'angle de retard est une tension analogique 0-10V. Cette tension doit être traduite en mot binaire de 8 bits sa valeur numérique maximale étant 240. Pour faire cette conversion nous avons utilisé un AD7569 ce qui n'est pas un choix très logique car la partie CNA du circuit n'est pas utilisée ici. La raison de ce choix était simplement la disponibilité immédiate du circuit au laboratoire. L'impédance d'entrée de ce circuit est faible, il a donc fallu le faire précéder d'un amplificateur. Disposant d'une seule tension d'alimentation de 5V nous avons dû choisir un modèle correspondant dit « rail to rail ». Le modèle utilisé est un AD820 mais il peut être remplacé par n'importe quel amplificateur de la même catégorie. Le convertisseur est suivi d'une EPROM 2716 dont le contenu est simplement la loi arccos telle qu'elle est décrite dans l'article original (avec la butée évitant d'atteindre  $\psi=180^\circ$  pour préserver l'angle de garde). Le convertisseur est commandé par le signal « oscout » issu du CYC372. Ce signal est l'inverse du signal d'horloge. Ainsi une nouvelle conversion est déclenchée sur chaque front descendant de l'horloge. La conversion étant effectuée en quelques microsecondes, le résultat est prêt bien avant qu'il soit lu, au front montant d'horloge suivant. La valeur numérique de  $\psi$  est donc remise à jour 24000 fois par seconde.

### 2.4 – Le compteur et l'additionneur :

Ces deux éléments sont programmés en VHDL dans le CYC372. Aucune difficulté n'existe de ce côté. On a prévu un compteur sur 10 bits ce qui est plus que le strict nécessaire. Le contenu instantané du compteur n'est pas accessible de l'extérieur. C'est en effet inutile puisqu'on n'utilise, pour commander la ROM, que le résultat de l'addition avec  $\psi$ .

### 2.5 – L'EPROM contenant les séquences d'amorçage :

Pour chaque configuration de pont, l'EPROM doit contenir au moins l'équivalent d'une période et demi du secteur. Il faut donc au moins 720 lignes par configuration. Ceci impose en fait 1 koctet par configuration si l'on veut une commutation facile d'une configuration à l'autre. Ainsi, si l'on se contente des montages P2/PD2 et P3/PD3, une

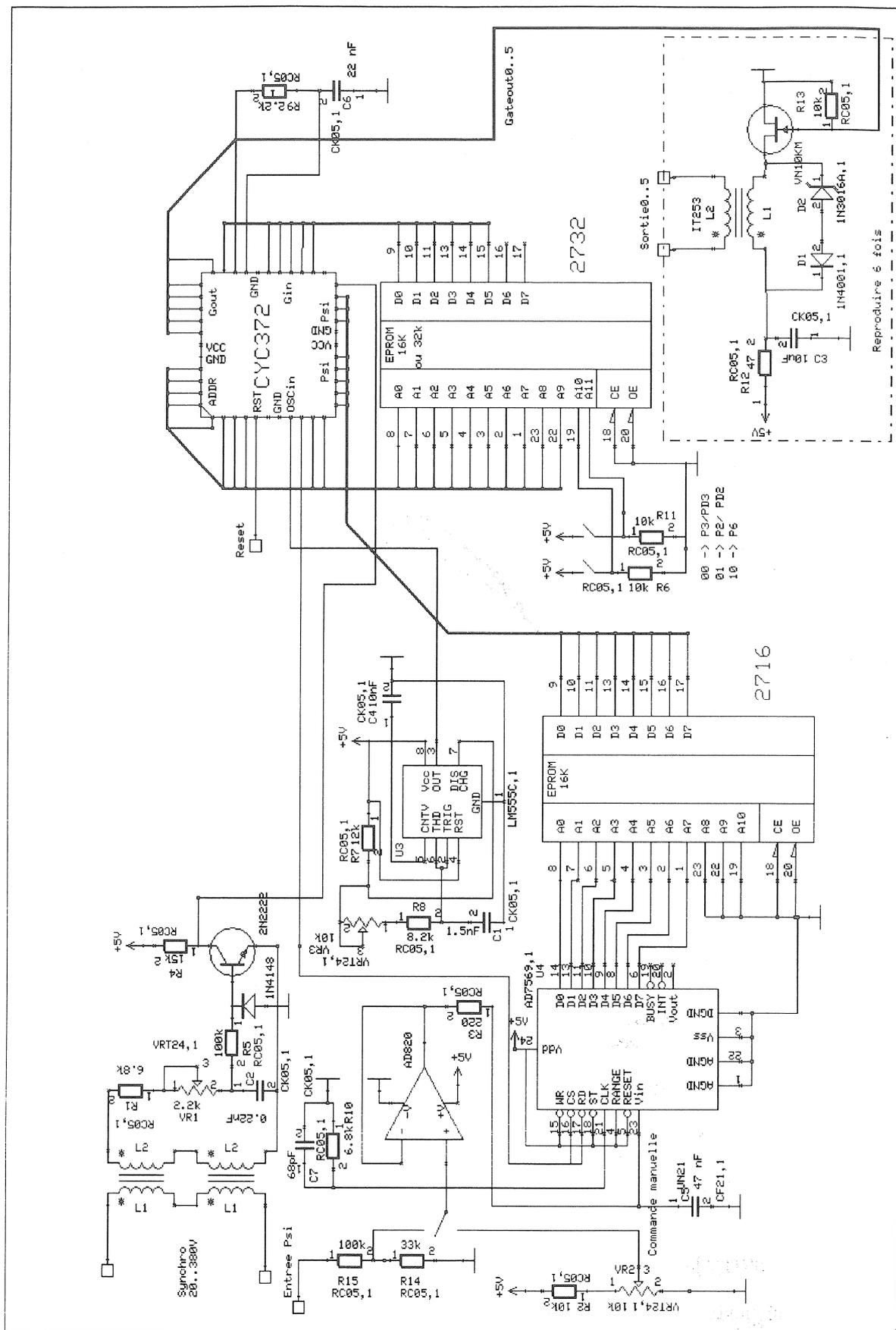


Figure 2

2716 suffit. Si on désire ajouter le P6 il faut prévoir une 2732. Pour le contenu de l'EPROM on se reportera à l'article original (Il suffit de modifier le nombre de lignes par séquence).

#### 2.6 – La commande des gâchettes de thyristor :

Le contenu de l'EPROM doit être découpé au rythme de l'horloge. C'est encore le CYC372 qui en est chargé. Il suffit en effet d'effectuer un « and » avec le signal d'horloge pour obtenir le résultat désiré. C'est pourquoi les 6 signaux de gâchette issus de l'EPROM sont renvoyés sur le circuit numérique avant d'être transmis aux circuits de puissance.

La partie « puissance » de la commande est organisée autour d'un petit MOS de puissance directement commandé par les signaux issus du CYC372. Un transformateur d'impulsions isole la commande des circuits de puissance des thyristors. Une diode de roue libre en série avec une diode zener permet la démagnétisation rapide des transformateurs.

#### 2.-7 – Programmation du CYC372 :

Toutes les broches du composants étant utilisées sur le montage il n'était pas facile de prévoir la connexion des fils de programmation sans compliquer le montage. On a donc choisi de programmer le composant hors du montage ce qui est facile car le composant est monté sur un support et peut être enlevé et remis facilement. On dispose donc, pour la programmation, d'une petite maquette auxiliaire munie simplement d'une alimentation 5V et d'un cordon 10 broches au format CYPRESS. La programmation elle-même est faite à l'aide du kit ISR de CYPRESS ( logiciel + cordon de liaison). Le fichier \*.JED est, bien sûr, obtenu à partir du programme VHDL, avec le compilateur WARP. Tout ce processus est extrêmement facile à mettre en œuvre et fonctionne de manière remarquablement simple.

### 3 – Conclusion

On dispose ainsi d'une commande moderne assez facile à construire et très facile à mettre en œuvre. Le point faible de cette commande est sans doute le filtrage un peu sommaire du signal de synchronisation. Nous avons été tenté d'améliorer ce point en utilisant un filtre numérique prédictif réalisé à l'aide d'un microcontrôleur de la famille 8051. Un tel circuit s'est vite révélé beaucoup trop lent et il a fallu recourir à un 80251 pour obtenir un filtre fonctionnel à seulement 6 étages. Malheureusement, il n'existe pas, dans la famille 80251, de circuit à périphériques intégrés (CAN, ports d'entrée/sortie). On obtient alors un circuit complexe comportant de nombreux composants ce qui alourdit considérablement la maquette. L'expérience nous a montré qu'un tel filtre ne s'imposait pas si on réalisait un montage « propre » avec des masses correctement reliées et réunies à la terre. C'est pourquoi le schéma que nous avons définitivement retenu est celui qui est reproduit figure 2. Tel qu'il est, ce schéma, nous donne pour l'instant entièrement satisfaction.

### 4 – Annexe

#### Listing de définition VHDL du CYC372

```
library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;
use work.std_arith.all ;

-- Compteur 10 bits --
ENTITY compt_10 is
  port(clk, rst : in std_logic ;
        s :out std_logic_vector(9 downto 0));
end compt_10 ;

architecture compt of compt_10 is
  signal q:std_logic_vector (9 downto 0);
  BEGIN
    s <= q;
    process(clk)
    begin
      if (clk = '1' and clk'event) then
        if rst = '1' then q <= "0000000000" ; else
          q <= q+1 ;
        end if;
      end if;
    end process;
  end architecture;
```

```
end if ;
    end if;
    end process ;
END compt ;

-- additionneur 10 bits --
library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;
use work.std_arith.all ;
ENTITY ADDER_10
IS PORT(
    a: IN std_logic_vector(7 downto 0);
    b: IN std_logic_vector(9 downto 0);
    sum : out std_logic_vector (9 downto 0));
END ADDER_10;

ARCHITECTURE adder_10 of adder_10 IS

signal aa: std_logic_vector(9 downto 0);
BEGIN
    aa <= "00" & a ;
    sum <= aa + b ;
END;

library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;

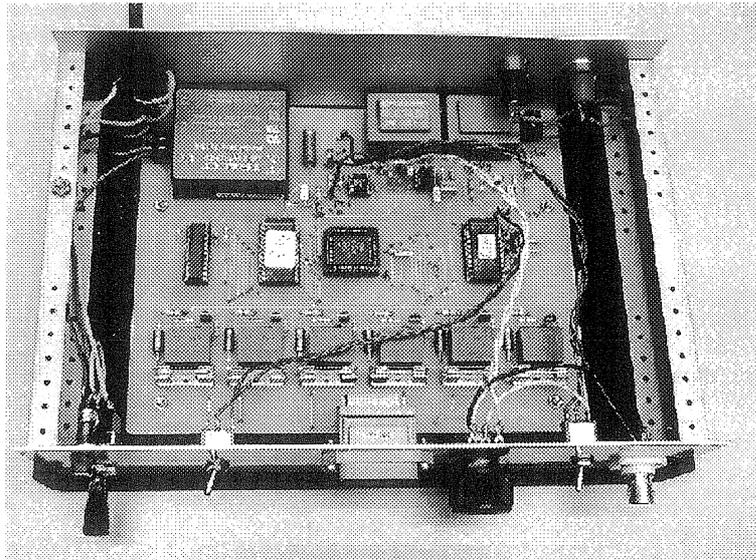
ENTITY Compt_add IS
    PORT(clk, oscin1, sync, timer: in std_logic;
        oscout1, sync_out: buffer std_logic;
        gatein: in std_logic_vector(5 downto 0);
        gateout: out std_logic_vector(5 downto 0);

psi : in std_logic_vector (7 downto 0);
    addr :out std_logic_vector (9 downto 0);
    rst :buffer std_logic);

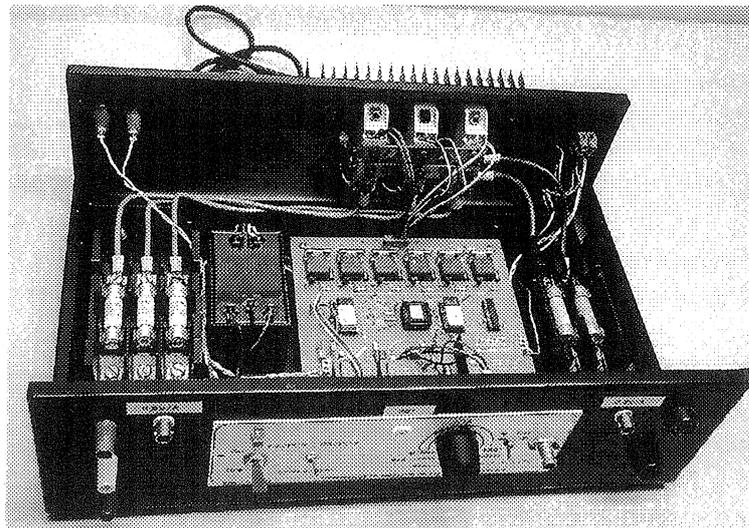
ATTRIBUTE pin_numbers of Compt_add: ENTITY IS
    "addr(0):2 addr(1):3 addr(2):4 addr(3):5 addr(4):6 addr(5):7 addr(6):8 "
    & "addr(7):9 oscin1:13 oscout1:14 addr(8):15 addr(9):16 psi(0):17 "
    & "psi(1):18 psi(2):19 psi(3):20 psi(4):21 psi(5):24 psi(6):25 psi(7):26 "
    & "sync:27 rst:28 gatein(0):29 gatein(1):30 gatein(2):31 "
    & "gatein(3):32 gatein(4):33 timer:35 sync_out:36 gatein(5):37 gateout(0):38 "
    & "gateout(1):39 gateout(2):40 gateout(3):41 gateout(4):42 gateout(5):43 ";
END Compt_add;

ARCHITECTURE Compt_add of compt_add IS
    COMPONENT adder_10
PORT(
    a: IN std_logic_vector(7 downto 0);
    b: IN std_logic_vector(9 downto 0);
    sum : out std_logic_vector (9 downto 0));
END COMPONENT;

COMPONENT compt_10
    PORT(clk, rst : in std_logic ;
        s :out std_logic_vector(9 downto 0));
END COMPONENT ;
```



Vue intérieure de la maquette  
Figure 3



Vue de la commande utilisée pour un pont triphasé à 6 thyristors  
Figure 4

```
signal cpt_out: std_logic_vector (9 downto 0);
signal nsync: std_logic ;
BEGIN
  oscout1 <= not oscin1;
  gateout(0) <= gatein(0) and oscout1;
  gateout(1) <= gatein(1) and oscout1;
  gateout(2) <= gatein(2) and oscout1;
  gateout(3) <= gatein(3) and oscout1;
  gateout(4) <= gatein(4) and oscout1;
  gateout(5) <= gatein(5) and oscout1;
  nsync <= not(sync);
  sync_out <= not(nsync);
  rst <= (timer xor sync_out)and nsync ;
v1: compt_10 port map(oscout1,rst,cpt_out);
v2: adder_10 port map(psi,cpt_out,addr);
END compt_add;
```

## MICHEL FARADAY ET LE DEVELOPPEMENT DE L'ELECTRICITE

### Seconde partie<sup>1</sup>

Jean-Claude BOUDENOT

THOMSON-CSF COMMUNICATIONS

Directeur Technique, Responsable du CET Durcissement,

Membre du Collège Scientifique et Technique,

Unité Durcissement, Instrumentation et Sécurité des Systèmes.

---

### II. FARADAY ET LE DEVELOPPEMENT DE L'ELECTRICITE

Michael Faraday (1791-1867) est une personnalité tout à fait extraordinaire dans l'histoire de la physique. Il y a à cela plusieurs raisons. Il est parfaitement autodidacte et n'a fait aucune étude. Il consigne scrupuleusement ses 46 années de recherche dans un journal qu'il ouvre en 1816 à 25 ans et qu'il referme le 23 mars 1862 à 71 ans. Ce journal qui comprend 16 041 recherches numérotées ne contient aucune formule mathématique !: «cependant la marche de son esprit avait la rigueur de l'esprit mathématique» dira Maxwell. Il est peut-être, ajoute une de ses biographes, Germaine Hirtz, «le plus grand expérimentateur de tous les temps». Sir Arthur Schuster ajoutera : «De tous les hommes qui ont consacré leur existence aux découvertes expérimentales, aucun n'a jamais approché Michael Faraday par le nombre, la variété et l'importance des phénomènes nouveaux que ses travaux ont révélés». Enfin comme le souligne Louis de Broglie, «Faraday n'était pas seulement un des plus grands génies scientifiques de tous les temps, c'était une personnalité des plus attachantes».

#### Faraday rencontre Davy

Michael Faraday naît le 22 septembre 1791 d'un père forgeron. Il écrit : «Mon éducation a été des plus médiocre, ne comportant guère plus que les rudiments de l'écriture, de la lecture et du calcul dans une école primaire ordinaire. Les heures que je ne passais pas à l'école, se passaient à la maison ou dans les rues». Sa carrière se décide lorsqu'il entre chez un libraire relieur à l'âge de 13 ans, en 1804 : «J'y suis resté 8 ans et pendant tout ce temps j'ai

relié des livres. C'est dans ces livres que j'ai commencé mon apprentissage philosophique... ». Il ajoute : «Le désir de faire de la recherche scientifique et fusse de la manière la plus humble, me conduisait, étant apprenti relieur, à écrire en toute simplicité d'esprit et dans mon ignorance des usages du monde à Sir Joseph Banks» (qui est alors président de la Royal Society). Mais Faraday n'obtient pas de réponse. Toutefois, comme l'a écrit André Maurois «Toute grande vie naît de la rencontre d'un grand hasard», ce hasard pour Michael Faraday c'est Humphry Davy.

Lorsqu'il est apprenti relieur, Faraday aime beaucoup les expériences, et il va écouter les leçons de chimie professées par H. Davy à la Royal Institution (qui comme le Collège de France à Paris est accessible librement à tout public). Faraday souhaite, comme il le dira plus tard, «s'enrôler sous le drapeau de la science, car [elle] doit rendre aimable et généreux tous ceux qui la cultivent... Aussi pris-je la résolution hardie d'écrire à Sir Humphry Davy pour lui faire connaître mon souhait et exprimer l'espoir qu'il voudrait bien m'aider à le réaliser si l'occasion se présentait». Il joint à sa demande les notes qu'il a prises durant les cours de Davy, soigneusement recopiées dans un volume in quarto intitulé : «Four lectures being part of a course on the elements of chemical philosophy delivered by Sir H. Davy at the Royal Institution and taken from notes by M. Faraday» (1812). Davy répond le 24 décembre 1812 au jeune relieur en ces termes : «Monsieur... Je suis bien loin d'être fâché de la marque de confiance que vous me donnez, car elle fournit en même temps la preuve, non seulement d'un zèle peu commun, mais d'une grande force de mémoire et d'attention. Je suis obligé de quitter Londres et je ne m'y trouverai

1.

La première partie de ce texte "Le développement de l'électricité : des origines à Faraday" a été publiée dans le n°19 de *la Revue 3EI*, en décembre 1999.

*La découverte de l'induction*

C'est en 1831, le 29 août précisément, que Faraday fait la découverte qui immortalisera son nom ; *l'induction*. Sur un anneau en fer de «6 pouces de diamètre et 1 pouce d'épaisseur», il enroule deux bobines de fil de cuivre en spirales isolées par de la ficelle. Les extrémités d'une de ces bobines sont connectées à une pile, et celles de la seconde à un «galvanomètre» simplement formé d'un fil placé au-dessus d'une aiguille aimantée. Il observe qu'à chaque ouverture ou fermeture du circuit de la pile, l'aiguille aimantée dévie. Il constate que le *courant induit*, comme il l'appelle, n'apparaît que de façon transitoire lors des seules fermetures et ouvertures du circuit. Le 24 novembre 1831 il décrit, dans un mémoire communiqué à la Royal Society, le second volet du phénomène d'induction : l'apparition de courants induits dans un solénoïde lorsque l'on y fait pénétrer un barreau aimanté.

*Le premier cas d'induction, par variation temporelle du flux magnétique, est appelé cas de Neumann et est lié au champ électromoteur  $E_m$  par la relation :* 
$$\vec{E}_m = -\text{rot}(\vec{E}_m) = -\partial\vec{B}/\partial t$$

*Le second cas d'induction, lié au mouvement, est appelé cas de Lorentz et est lié au champ électromoteur par une autre relation ;* 
$$\vec{E}_m = \vec{v} \wedge \vec{B}$$
. *La circulation du champ électromoteur entraîne une différence de potentiel, improprement appelée «force électromotrice» e, donnée par :* 
$$e = \int \vec{E}_m \cdot d\vec{l}$$

*Les apports de Lenz, Henry et Neumann*

Curieusement, bien qu'en possession de toutes les observations expérimentales nécessaires, Faraday n'indique pas que les courants induits circulent toujours dans un sens tel qu'ils s'opposent à la cause inductrice, laissant à Lenz (1804-1865) le soin d'énoncer cette loi à laquelle celui ci laissera son nom.

*Henri Frédéric Lenz (1804-1885) est un physicien russe, surtout connu pour ses recherches en électromagnétisme. Lenz énonce sa loi en 1834 de la façon suivante : « Tout circuit métallique, déplacé dans le voisinage d'un courant galvanique ou d'un aimant, devient le siège d'un courant dont la direction est telle qu'il tendrait à donner au circuit en repos un mouvement de sens contraire à celui qu'on lui a donné, étant supposé que le circuit n'est mobile que dans cette direction ou dans la direction contraire ».*

En 1832, *Joseph Henry (1797-1878)*, qui vient d'être nommé professeur de physique à Princeton, construit le plus grand électroaimant de l'époque (capable de soulever une masse de 1800 kg). Il peut générer d'intenses courants induits. Au cours de ses

expériences il découvre le phénomène de self-induction. C'est ainsi à juste titre que l'unité d'inductance recevra le nom du physicien américain lors du congrès international de Chicago de 1893.

*Franz Neumann* établit quant à lui la : « Théorie mathématique de l'induction » ( Académie des Sciences de Berlin, 27 octobre 1845). Il donne en particulier la formule permettant de calculer la force électromotrice ( $e = - d\phi/dt$ ). Son nom reste par ailleurs attaché à la formule donnant le coefficient d'inductance mutuelle de deux circuits.

*Faraday introduit la notion de champ*

Faraday avance à grands pas dans le domaine de l'électromagnétisme. Il est le premier à concevoir intuitivement la notion de champ, tout en utilisant la notion d'*ether* pour justifier la transmission des actions de proche en proche. Il matérialise les «lignes de force magnétique» par de la limaille de fer. Les traditionnelles expériences associées faites dans nos classes de lycée sont directement issues des cahiers de laboratoire de Faraday qui a été jusqu'à y fixer la limaille, dessinant ainsi les lignes de champ magnétique engendrées par un fil ou un solénoïde parcouru par un courant.

Maxwell comprendra parfaitement l'importance des travaux de Faraday, et il écrira «... En commençant l'étude sur l'électricité je résolus de ne lire aucun travail mathématique sur ce sujet, avant de posséder à fond les recherches expérimentales sur l'électricité de Faraday».

Faraday est par ailleurs persuadé des liens qui existent entre les différentes forces de la nature. Il serait aujourd'hui à n'en pas douter un farouche partisan des théories unifiées. Maxwell écrira «la théorie électromagnétique de la lumière, telle qu'il la propose, est la même en substance que celle que j'ai commencée à développer dans cet article, sauf qu'en 1846 il n'y avait pas de données permettant de calculer la vitesse de propagation». Faraday avance dans ses recherches avec la rigueur mathématique et comme l'a écrit Helmholtz «il est tout à fait remarquable de voir le grand nombre de théorèmes dont la démonstration exige les ressources de l'analyse mathématique la plus élevée et que Michael Faraday a découvert par une sorte d'intuition».

A plusieurs reprises Faraday s'ouvre du handicap que représente pour lui sa méconnaissance des mathématiques. Ainsi le 5 septembre 1827, il écrit à Ampère : «... les progrès de l'électromagnétisme sont tels qu'ils entraînent de continuelles références à votre nom, et, en de telles occasions, je suis fier de me souvenir de notre amitié, de sa cause, bien qu'en même temps ma joie soit un peu diminuée par le sentiment que mon ignorance des mathématiques est un obstacle à des échanges qui, par ailleurs,

installé de nouveau que vers la fin de janvier ; je vous verrai alors au moment qui vous conviendra le mieux. Je serai heureux de vous être utile, et je souhaite que cela me soit possible. Votre très humble et obéissant serviteur».

*Faraday chimiste.*

C'est ainsi que Faraday entre à la Royal Institution en mars 1813 comme aide préparateur. Au mois d'octobre, il accompagne Davy dans un voyage, qui les emmène en France, Italie, Suisse, Allemagne et Belgique et au cours duquel ils rencontrent Arago, Chevreul, Gay-Lussac, Clément Desormes, Ampère, Volta... Ils rentrent à Londres à la Royal Institution en avril 1815. Faraday y restera toute sa vie. Au contact de Davy ses premiers travaux portent tout naturellement sur la chimie. Dès 1818, il fait des recherches sur les aciers, l'objectif étant d'améliorer leur qualité et particulièrement de les rendre inoxydables. Il élabore un acier au platine (un canif réalisé par Faraday avec cet acier est visible à l'Académie des Sciences dans la vitrine d'Arago), puis une variante moins coûteuse d'acier chromé, premier exemple d'aciers spéciaux.

En 1820, alors qu'Ampère réalise sa synthèse de l'électrodynamique, Faraday découvre deux chlorures de carbone ; l'hexachloroéthane — C<sub>2</sub>Cl<sub>6</sub> — et le tetrachloroéthylène — C<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub> — ce qui attire sur lui l'attention du public... et des chimistes. C'est ainsi que le grand Gay-Lussac (1778-1850) lui écrit, dans une lettre datée du 12 janvier 1821, «j'ai reçu... les échantillons des chlorures de carbone que vous avez découverts. Je vous fais mes remerciements pour l'obligeance que vous avez mise dans votre lettre et je vous prie d'agréer mes félicitations pour la belle découverte que vous avez faite».

*Produire de l'électricité avec du magnétisme*

Alors que la chimie lui ouvre les portes des honneurs (il est nommé correspondant de l'Académie des Sciences (1823), membre de la Royal Society (1824) et directeur du laboratoire de la Royal Institution (1825)), il réalise en 1821 ses premiers grands travaux en physique et note sur son carnet «produire de l'électricité avec du magnétisme», préoccupation qu'il gardera constante pendant dix ans. Les travaux en question portent sur les *rotations électromagnétiques* (1821). Alors que les forces électriques sont de nature attractive ou répulsive, les forces magnétiques s'exercent dans un plan perpendiculaire à celui formé par la ligne de courant ( $\vec{id}$ ) et le champ magnétique  $\vec{B}$  (comme l'indiquera l'expression donnée par Laplace/Ampère  $d\vec{f} = \vec{id} \wedge \vec{B}$ ).

Faraday réalise ses travaux sur les *rotations électromagnétiques* entre septembre et décembre 1821. Il les résume en ces termes à Gaspard de la Rive : «Je trouve que les attractions

et les répulsions que l'on considère d'habitude entre le fil conjonctif et l'aiguille magnétique sont des illusions, les mouvements ne sont pas le résultat de quelque force attractive, mais d'une force due au fil, qui au lieu de tendre à en rapprocher ou à en éloigner le pôle le fait tourner sur un cercle sans fin, mouvement qui dure tant que la batterie est en action». C'est ainsi que Faraday réalise le premier ancêtre du moteur électrique. Ampère lui écrira «la chimie et la physique ont toutes deux été honorées de vos travaux, et je vous dois beaucoup personnellement pour vos expériences sur les rotations électromagnétiques».

*Faraday la liquéfaction des gaz, le benzène et les verres lourds*

Ses recherches en magnétisme ne lui font pas oublier ses autres préoccupations, en particulier dans le domaine de la liquéfaction des gaz, domaine sur lequel il travaillera de 1823 à 1845. Son premier succès est rapporté par Tyndall : Le docteur Paris entre par hasard dans le laboratoire de Faraday et raille le jeune chimiste sur le manque de netteté de son matériel. Faraday ne répond pas, mais le lendemain le docteur reçoit cette courte missive de Faraday : «Cher Monsieur, l'huile que vous avez vue hier n'était autre que du chlore liquide». Il liquéfie ensuite successivement H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, HCN et NH<sub>3</sub>.

En 1844, par 50 atmosphères et -110 °C, il parvient à liquéfier l'hydrogène phosphoré, l'hydrogène arsénié et l'acide fluosilicique. Le 14 décembre de cette année, il écrit au chimiste français Jean Baptiste Dumas (1800-1884) : «Alors si ce point de vaporisation est, comme cela semble le cas, plus bas pour les corps les plus volatils et les plus légers parmi les gaz, il y a peu ou pas d'espoir de liquéfier des corps tels que l'hydrogène, l'oxygène ou l'azote à une pression quelconque, tant qu'ils sont maintenus à des températures ordinaires ou même de très basses températures».

Ces gaz, il les appelle «gaz permanents».

*Le dernier gaz — l'hélium — ne sera en fait liquéfié que 64 ans plus tard en 1908 par le physicien Heike Kammerlingh Onnes.*

En 1825, il découvre le benzène et en fait état à la Royal Society sous le nom de «dihydrure de carbone». Ce n'est que bien plus tard que le chimiste Kékulé aura l'idée (en faisant le rêve d'un serpent qui se mord la queue) que la molécule de benzène se referme sur elle-même. Cette même année, la Royal Society, le charge d'une étude sur les verres, afin d'améliorer la qualité des lunettes et des instruments d'optique. Il obtint en 1829 un verre «pesant» au borate de plomb et à la silice, jaunâtre mais... sans applications pratiques. C'est toutefois ce verre qui sera à l'origine de sa découverte 16 ans plus tard de l'«effet Faraday» (1845) !

seraient pour moi du plus grand intérêt. Toutes les fois que je pense à l'électromagnétisme, j'ai cinquante questions à vous poser, mais cela ne vaut pas la peine de les écrire... "

En 1857 il écrit de même à Maxwell : "Il y a une chose que j'aimerais vous demander : lorsqu'un mathématicien, engagé dans l'étude d'actions et de résultats physiques, est arrivé à ses conclusions, celles-ci ne peuvent-elles pas s'exprimer en langage commun de manière tout aussi complète, claire et définitive que dans des formules mathématiques ? Si oui, ne serait-ce pas une aubaine pour des personnes telles que moi qu'elles soient exprimées ainsi, traduites hors de leurs hiéroglyphes de façon à ce que nous puissions y travailler avec des expériences. Je pense qu'il doit en être ainsi car j'ai toujours trouvé que vous arriviez à me transmettre une idée parfaitement claire de vos conclusions, qui, bien qu'elles ne me permettent pas de comprendre entièrement les étapes de votre processus, m'en donnent les résultats ni en deçà ni au-delà de la vérité, et si clairs qu'à partir d'eux je peux penser et travailler. Si ceci était possible, ne serait-il pas bon que les mathématiciens qui travaillent sur ces sujets nous donnent les résultats dans cet état, exploitable, utile et populaire, en plus de la forme qui leur est propre ? "

Il est à noter que Faraday, mort en 1867, a pu prendre connaissance des premiers éléments de la synthèse de l'électromagnétisme réalisée par Maxwell sous sa forme initiale en 1864 ("Théorie dynamique du champ électromagnétique"), et précédée - peut-être à l'attention de Faraday - d'un exposé très clair des buts de l'article et des équations du champ.

#### *Faraday et les lois de l'électrolyse*

Peu avant 1800, une controverse était née entre Volta et Galvani au sujet de l'électricité animale, controverse qui a conduit à la découverte de la pile. En 1831, outre le courant issu des machines électrostatiques d'une part et des piles d'autre part, un troisième type de courant, provenant de l'induction, apparaît. 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", "voltamètre"... Son nom restera attaché aux lois de l'électrolyse qu'il a découvertes (*lois de Faraday*) ainsi qu'à la quantité d'électricité associée à une mole d'électron (1 faraday =  $N_e = 96\ 500$  coulomb où  $N$  indique le nombre d'Avogadro).

Il montre ainsi 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".

*On donnera plus tard à la mole d'électron le nom de Faraday ; 1 faraday =  $N_e = 610^{23} \times 1,610^{-19}C$  = 96500 coulombs.*

#### *Des diélectriques à la cage de Faraday*

En 1835, Faraday se lance à l'assaut de la propriété qu'ont les isolants de laisser le champ électrique les traverser, ce qui le conduit à les baptiser diélectriques, du grec dia : à travers. En introduisant différents corps isolants entre deux conducteurs, il montre que la capacité d'un condensateur varie. Il interprète le phénomène par la polarisation des diélectriques et introduit la notion de constante diélectrique  $\epsilon_r$  (qu'il appelle à l'époque capacité inductive spécifique). En reconnaissance de ses travaux, l'unité de capacité sera dénommée farad, en 1891, lors du congrès international d'électricité de Paris. Cette même année 1835, Faraday s'intéresse au phénomène d'influence, et construit au cours de ses recherches la célèbre cage de Faraday (la première est un cube de 12 pieds dont les parois métalliques sont reliées au sol).

#### *La décharge dans les gaz*

Dans la continuité de ses travaux sur la transmission de l'électricité à travers divers milieux, il examine la décharge dans les gaz progressivement raréfiés, et il observe ce que l'on appelle maintenant "l'espace obscur de Faraday" qui se produit au voisinage de la cathode lorsque la pression est suffisamment basse. Les techniques du vide étant à l'époque insuffisantes, il passe à côté d'un ensemble de découvertes majeures qui ne seront faites (avec le même point de départ) qu'à la fin du XIXe siècle (tubes de Crookes, de Hittorf, rayons X, électrons...).

*Travailleur acharné, Faraday ne se permet plus aucune distraction à partir de 1831, son esprit étant totalement concentré à la résolution des problèmes scientifiques. Il dépasse la limite de ses forces et est victime de vertiges et d'amnésie. Il doit cesser toute activité intellectuelle et part se reposer en Suisse, entouré des siens, pendant une période de 4 ans (1840-1844).*

#### *L'effet Faraday*

De retour de Suisse, Faraday s'intéresse au rapport entre magnétisme et lumière. Il étudie l'action d'un

champ magnétique sur la lumière polarisée traversant différents milieux, et découvre, en utilisant le verre lourd qu'il avait mis au point en 1829, que le plan de polarisation de la lumière tourne d'un certain angle lorsqu'elle traverse le verre lourd soumis à un fort champ magnétique. Cette découverte importante - maintenant appelée "effet Faraday" - date du 13 septembre 1845. Faraday l'inscrit dans son journal et ajoute "assez fait pour aujourd'hui".

#### *Paramagnétisme et diamagnétisme*

Cette même année, en étudiant le comportement de différents matériaux placés, dans l'entrefer d'un électroaimant, il constate que certains d'entre eux s'orientent parallèlement au champ (cas du chlorure de fer  $\text{FeCl}_3$ ...) tandis que d'autres s'orientent perpendiculairement (bismuth, verre lourd...). Il appelle paramagnétiques les corps qui agissent comme le chlorure de fer et diamagnétiques les corps qui agissent comme le bismuth.

*Faraday est alors au faite de sa gloire. En 1844 il est nommé membre étranger de l'Académie des Sciences de Paris. En 1856 il est fait commandeur de la Légion d'Honneur par Napoléon III, mais il refuse d'être anobli par la reine Victoria voulant rester jusqu'à sa dernière heure Michael Faraday.*

*Hermann von Helmholtz dira en 1853 "... je réussis à rencontrer le premier physicien d'Angleterre et d'Europe : Faraday".*

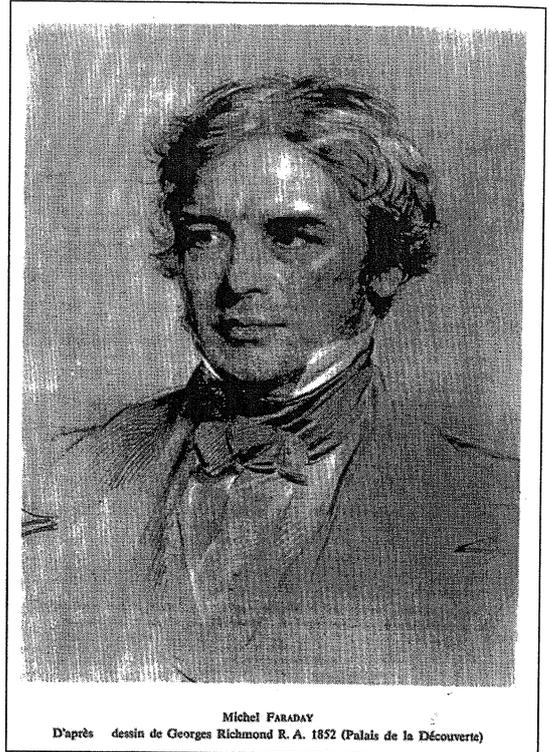
#### *Dernières recherches*

Ces dernières recherches sont inspirées par sa foi en l'unité des forces. Il étudie l'effet d'un champ électrique sur un faisceau lumineux, sans succès, mais la découverte sera faite par John Kerr (1824-1907) en 1875 (effet Kerr), à partir des travaux initiaux de Faraday et d'un matériel plus élaboré. Il étudie également l'effet d'un champ magnétique sur le spectre d'une source lumineuse, en vain, mais ses travaux seront repris avec succès 34 ans plus tard par Pieter Zeeman (1865-1943) qui découvrira en 1896 "l'effet Zeeman", immédiatement interprété par H. A. Lorentz. Faraday a également la conviction qu'un champ de gravitation peut avoir un effet sur la lumière. Cette grande découverte sera faite... 56 ans plus tard par Albert Einstein dans le cadre de sa théorie de la relativité générale.

Faraday referme son journal de recherche le 23 mars 1862. Il se retire à Hampton Court dans une maison que la reine Victoria lui a offerte, en reconnaissance de l'Angleterre pour son génie, et y meurt cinq ans plus tard le 25 août 1867.

Henri Sainte Claire Deville écrira en introduction à une notice biographique "Michael Faraday est la plus grande figure scientifique du temps présent. Cela tient à deux causes principales. D'abord son génie inventif en théorie appelle l'application par la

manière dont il sait démontrer et développer ses idées à l'aide d'expérience... En second lieu, la grandeur et la bonté de son caractère, la pureté inaltérable de sa vie scientifique, l'amour sincère du bien qu'il a toujours pratiqué,... ont exercé sur ses compatriotes et sur les nombreux étrangers qui le visitent, une attraction à laquelle je n'ai vu personne résister".



L'hommage est unanime, de Dumas prononçant son discours à l'Académie, à la mort de Faraday "je n'ai pas connu d'homme plus digne d'être aimé, d'être admiré, d'être regretté", à son ami de la Rive "jamais le mot génie n'a été mieux appliqué car Faraday alliait à l'imagination la plus riche, l'audace la plus incroyable", en passant par Maurice d'Ocagne "Faraday découvreur des lois nouvelles par l'expérience et Maxwell, comme inventeur de magnifiques théories opérant la synthèse de ces lois, resteront comme deux des plus grandes figures de la physique du XIXe siècle".

Quant à Faraday, il confie un jour à Tyndall que "la plus douce récompense de mon travail est la sympathie et la bienveillance qu'il m'a attirées des quatre parties du monde".

# LES INSTALLATIONS ELECTRIQUES

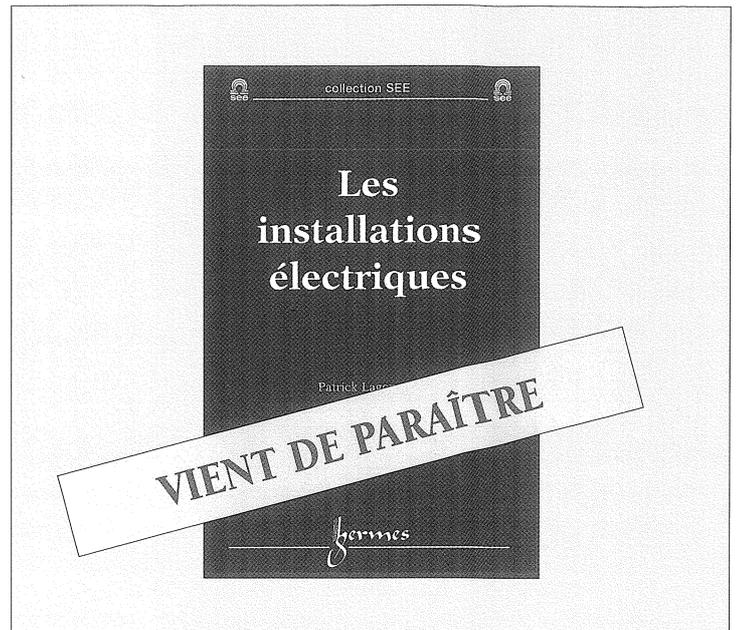
Patrick LAGONOTTE

Les ventes de matériels électriques par les entreprises françaises ont représenté 53 milliards de francs en 1998 (source GIMELEC).

Mais l'importance du secteur se mesure aussi aux conséquences d'une défaillance d'un élément du système électrique sur la sécurité des biens et des personnes.

LES INSTALLATIONS ELECTRIQUES, outils à l'usage des étudiants, futurs enseignants, chercheurs ou industriels présente les harmonieux compromis entre connaissance scientifique et règles de l'art que doivent respecter ceux qui participent à la construction d'une installation électrique.

PRIX DE VENTE : 280 F TTC\*



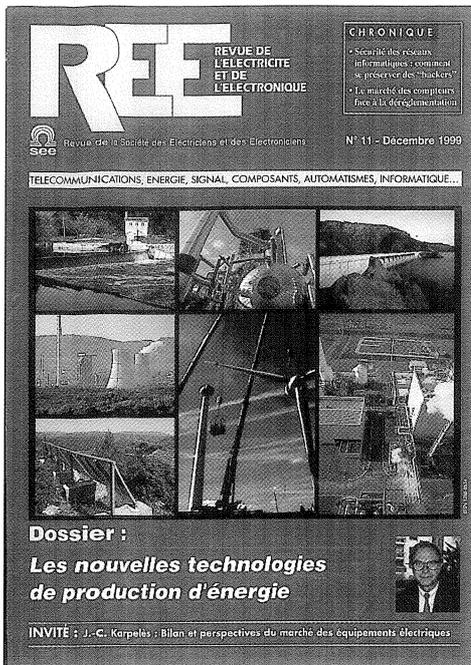
## BON DE COMMANDE - Ouvrages

à retourner à la SEE : 48, rue de la Procession - 75724 Paris Cedex 15

	Prix unitaire	Frais Expédition		Nbre d'ex.	Prix Total
		France	Etranger		
LES INSTALLATIONS ÉLECTRIQUES Patrick LAGONOTTE	280 F *	20 F	40 F	.....	.....
CONTACT ÉLECTRIQUE - L'appareillage de connexion Louis FECHANT - Editions Hermès	350 F *	20 F	50 F	.....	.....
CONTACT ÉLECTRIQUE - Phénomènes physiques et matériaux Louis FECHANT - Editions Hermès	350 F *	28 F	60 F	.....	.....

\* Prix hors Frais de Port

- ⇒ Veuillez trouver ci-joint mon chèque de : ..... FF à l'ordre de la SEE.
- ⇒ Je règle par virement sur le compte de la SEE :  
BNP Paris V Brancion - 26 rue de Vouillé - 75015 PARIS  
Compte N° : 3001 01402 00020183979 95 (frais bancaires à ma charge).



Profitez de notre offre  
pour commander  
dès maintenant  
ce dossier dédié  
aux  
**TECHNOLOGIES  
ACTUELLES DE  
PRODUCTION  
D'ÉLECTRICITÉ**

Et  
pour vous abonner  
aux 11 numéros de  
**REE**  
à paraître  
en 2000

**DOSSIER**

**Les technologies actuelles de production d'électricité**

Les moyens de production d'électricité suscitent actuellement des débats importants au sein de notre société. L'émergence de nouvelles technologies en accroît encore la passion avec notamment l'arrivée des moyens de production décentralisés de petite puissance. L'objet de ce dossier technique, qui constitue un outil de base pour toute réflexion sur ce sujet, est de dresser un panorama aussi large que possible qui donne un aperçu des différents moyens qui seront disponibles à l'horizon 2005 pour des investissements à réaliser en Europe Occidentale.

<b>Présentation</b> par J.- P. Jacquot .....	<b>32</b>
<b>La production d'électricité d'origine nucléaire</b> par R. Serres .....	<b>34</b>
<b>La chaudière à lit fluidisé circulant : mariage de l'écologie et de l'économie ?</b> par G. Labat .....	<b>41</b>
<b>Centrales hydroélectriques et apport de la vitesse variable</b> par G. Hémerly et J. Coulon .....	<b>46</b>
<b>Production électrique avec gazéification intégrée</b> par A. Bernard .....	<b>53</b>
<b>Les centrales à cycle combiné</b> par C. Kempf.....	<b>59</b>
<b>L'énergie éolienne : une énergie d'hier et de demain</b> par J.-M. Germa et P. Logandré.....	<b>68</b>
<b>L'électricité photovoltaïque</b> par Jean-Louis Bal .....	<b>74</b>
<b>Les microturbines pour la production décentralisée d'énergie</b> par J.-L. Meyer, F. Ribes .....	<b>79</b>
<b>Les piles à combustibles : une technologie propre</b> par J. Loughhead et S. Pyke .....	<b>84</b>
<b>La cogénération pour la production décentralisée d'énergie</b> par P. Barroyer .....	<b>89</b>
<b>La production d'énergies au moyen de systèmes diesels modernes</b> par T. De Neef, B. Mouille, P.-A. Destailleur .....	<b>95</b>

Détachez ce coupon et retournez-le à la SEE - 3EI - 48, rue de la Procession - 75724 Paris cédex 15

Nom : ..... Adresse : ..... N° de membre de la SEE : .....

Oui, je commande ..... exemplaires de REE n° 11/99 au prix unitaire de 65,00 F TTC (TVA 2,10%)

Je m'abonne à REE au tarif réservé aux membres de la SEE  France : 530 F  Etranger : 810 F

Je règle par  chèque bancaire à l'ordre de la SEE

virement bancaire sur le compte de la SEE - BNP Paris V Brancion - 26 rue de Vouillé - 75015 PARIS