

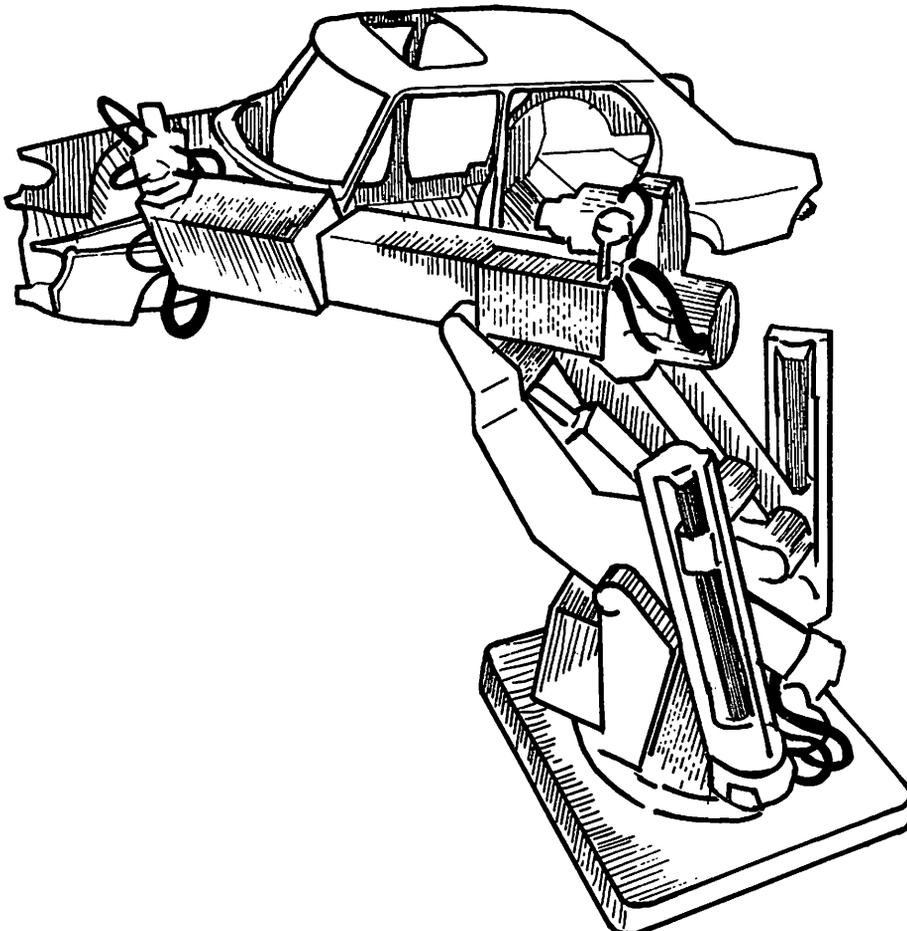
## Thème 5

# ROBOTS ET SOUDAGES INDUSTRIELS

Les thèmes « Chauffage électrique » et « Appareils ménagers » du tome 1 abordent l'électrothermie dans le domaine électrodomestique. Le choix d'une application industrielle liée au développement des automatismes s'est porté sur un poste de soudage robotisé. Suite à l'exposé d'informations générales sur les **robots industriels** nous avons développé l'étude d'un équipement robotisé de soudage électrique par points. Les **principaux procédés électrothermiques** sont ensuite présentés en choisissant le soudage comme support d'application.

### SOMMAIRE

1. Introduction : calculateurs et robots de soudage.
2. Manipulateurs et robots industriels.
3. Composition d'un robot.
4. Capteurs et robots.
  1. Capteurs de vitesse angulaire.
  2. Capteurs de vitesse linéaire.
  3. Capteurs d'accélération.
  4. Capteurs de force.
  5. Capteurs de couple.
5. Exploitation d'un robot.
  1. Programmation des robots.
  2. Caractéristiques de travail.
6. Présentation d'un robot utilisé en soudage électrique par points.
7. Étude du procédé de soudage par résistance dit « par points » et présentation de l'équipement.
8. Autres modes de soudage par résistance.
  1. Soudage par bossages.
  2. Soudage à la molette.
  3. Soudage en bout.
9. Soudage par bombardement électronique.
10. Soudage par faisceau laser.
11. Soudage à l'arc.
12. Soudage par induction électro-magnétique.
13. Soudage par hystérésis diélectrique.



# 1. INTRODUCTION

## CALCULATEURS ET ROBOTS INDUSTRIELS DE SOUDAGE

Avant 1950, les chaînes de production d'automobiles en particulier utilisaient de nombreux postes manuels à souder pour l'assemblage des divers éléments d'une carrosserie. Le travail de l'opérateur était pénible et fastidieux mais il autorisait une certaine souplesse (flexibilité) liée aux possibilités d'adaptation de l'homme à des travaux différents.

Après 1950, l'installation de machines multiples et de chaînes « transfert » a amené une plus grande productivité. Les pièces à assembler étaient déplacées devant des postes de soudage successifs comportant en général autant d'électrodes que de points à souder. Ces systèmes peu flexibles s'adaptaient difficilement aux changements de modèles et risquaient de ne pas être amortis en cas de mévente du produit pour lequel ils étaient conçus.

Au début des années 1960, les calculateurs et robots ont fait leur apparition.

A partir de 1975, l'industrialisation des micro-processeurs et des robots de soudage par résistance a permis un *éclatement* technologique dans les pays constructeurs d'automobiles. Le soudage électrique peut alors être assuré par des robots ce qui améliore la souplesse, la précision, la régularité et par conséquent la qualité de la production.

La flexibilité dans les ateliers est alors retrouvée par la mise en œuvre de deux éléments :

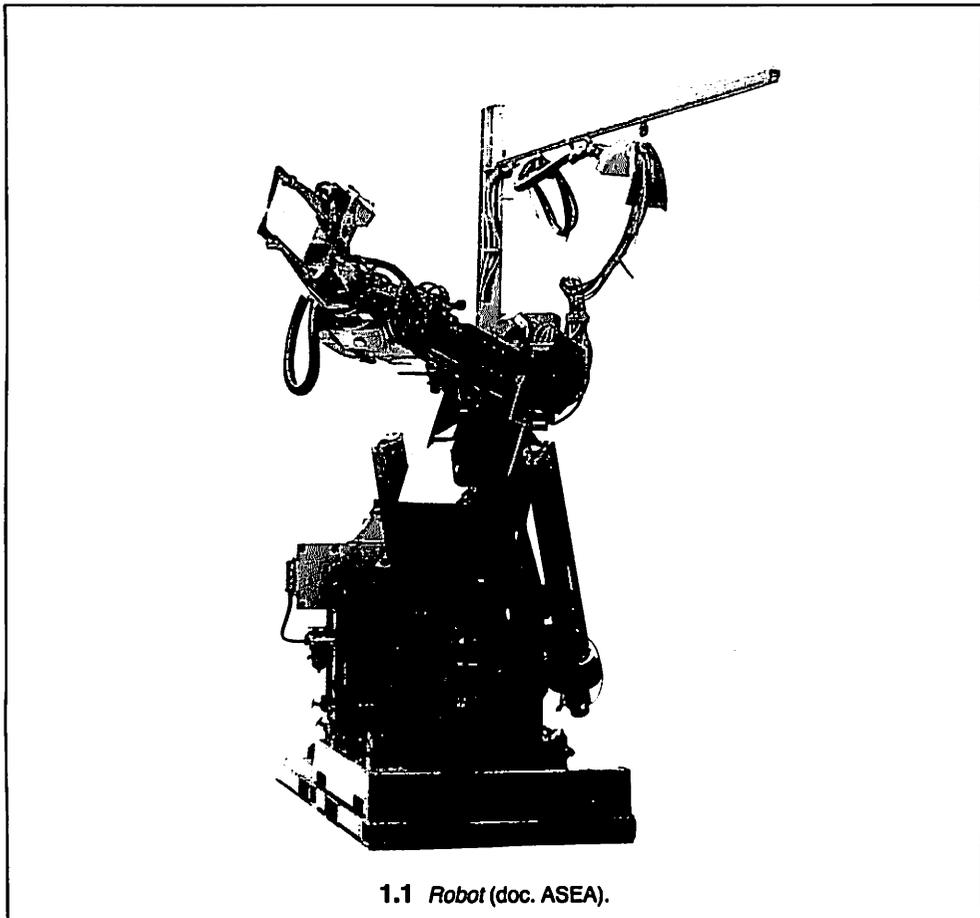
- le calculateur qui gère le processus d'assemblage et les pièces constitutives ;
- le robot qui effectue les travaux relatifs aux instructions transmises par l'unité de commande.

On comprend l'importance de l'entrée du ROBOT DE SOUDAGE dans la conception industrielle.

L'avènement de la ROBOTIQUE INDUSTRIELLE impose une nouvelle technologie.

Avec ce thème nous allons :

- Développer des informations générales sur les manipulateurs, la composition d'un robot, sa programmation et ses caractéristiques.
- Présenter un robot utilisé en soudage.
- Étudier le soudage électrique par résistance, dit par points, et présenter les éléments constitutifs d'un équipement.
- Exposer les principes des autres modes de soudage par résistance, par concentration d'énergie, par arc, par induction, par hystérésis diélectrique.



1.1 Robot (doc. ASEA).

## 2. MANIPULATEURS ET ROBOTS INDUSTRIELS

Un usage excessif du mot « robot » pour désigner des matériels de manipulation plus ou moins automatisés a rendu nécessaire une classification selon les modes de commande. Cette classification fait apparaître des équipements permettant d'assister l'opérateur et d'autres qui sont susceptibles de le remplacer.

### 1. MANIPULATEURS POUR CYCLES MANUELS ASSISTÉS

Ils permettent à un opérateur de déplacer des charges importantes en produisant un effort très faible.

### 2. TÉLÉMANIPULATEURS

Ils sont commandés par un opérateur à l'aide d'un manche de pilotage ou d'un bras articulé qui est la réplique réduite du manipulateur lui-même. Les mouvements effectués par l'opérateur sont quasi instantanément et fidèlement reproduits, permettant ainsi de travailler à distance avec des efforts moindres.

### 3. MANIPULATEURS AUTOMATIQUES A CYCLES SÉQUENTIELS

Ils assurent un nombre de cycles limités : succession de translations, rotations, suivant une logique séquentielle. Les courses des différents déplacements sont pré-réglées par action sur des butées, des cames ou des détecteurs de position (voir la fig. 2.1).

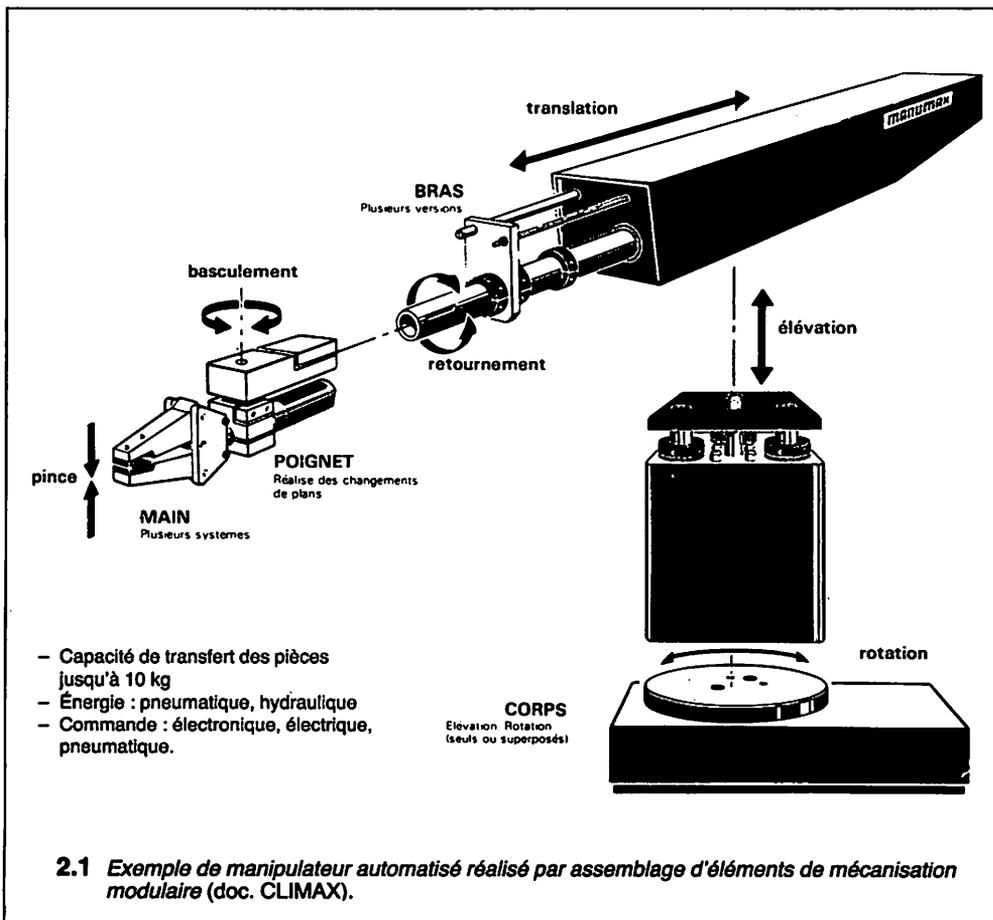
### 4. MANIPULATEURS AUTOMATIQUES A CYCLES PROGRAMMABLES OU ROBOTS INDUSTRIELS

Ils sont capables d'effectuer des opérations compliquées en obéissant à des instructions programmées. La commande simultanée de plusieurs de leurs axes permet d'obtenir des mouvements aux trajectoires complexes.

L'intégration du robot dans un environnement a fait apparaître deux écoles opposées de concepteurs. L'une pense que l'environnement doit être adapté au robot, l'autre estime que les robots dotés de capteurs sensoriels (vision, toucher, ouïe) peuvent modifier leur comportement en fonction de l'environnement. Cette deuxième école a généré les robots dits « intelligents » (voir la fig. 1.1).

### 5. DÉFINITION D'UN ROBOT INDUSTRIEL RETENUE PAR L'ISO ET L'AFNOR

« Manipulateur commandé en position, reprogrammable polyvalent, à plusieurs degrés de liberté, capable de manipuler des matériaux, des pièces, des outils et des dispositifs spécialisés, au cours de mouvements variables et programmés pour l'exécution d'une variété de tâches. Il a souvent l'apparence d'un ou plusieurs bras se terminant par un poignet. Son unité de commande utilise, notamment, un dispositif de mémoire et éventuellement de perception et d'adaptation à l'environnement et aux circonstances. Ces machines polyvalentes sont généralement étudiées pour effectuer la même fonction de façon cyclique et peuvent être adaptées à d'autres fonctions sans modification permanente du matériel. »



# 3. COMPOSITION D'UN ROBOT

Un robot se compose essentiellement d'un outil de travail, d'une structure mécanique liée aux éléments de motorisation et d'une unité de commande.

## 1. OUTIL DE TRAVAIL

Le rôle de l'outil appelé « effecteur » est capital car c'est l'organe qui agit directement sur les objets extérieurs. Pour une application au soudage par points, c'est une pince à souder généralement assimilée à la main du robot.

Les effecteurs sont extrêmement diversifiés et classés suivant leur fonction : préhension (pinces, buses, expenseurs, électro-aimants) ; projection (buses) ; soudage à l'arc (torches) ; etc. (voir la fig. 3.1).

## 2. STRUCTURE MÉCANIQUE

Le système mécanique à géométrie variable lié à un corps de référence (ou base) est appelé « porteur ». Il constitue en quelque sorte le corps, le bras et le poignet du robot. Cet ensemble doit, par des mouvements d'amplitude limitée, positionner et orienter l'outil en n'importe quel point de son volume de travail pour lui permettre d'assurer une tâche. Ceci sous-entend un déplacement dans l'espace selon trois coordonnées. En fait, les trois systèmes de coordonnées les plus utilisés déterminent les trois familles principales de robots : les coordonnées cartésiennes, cylindriques et sphériques (voir la fig. 3.2).

Il est à noter qu'un robot est dit à poste fixe quand la base est fixe et lorsque celle-ci repose sur un véhicule, le robot est dit mobile.

Les porteurs sont caractérisés par des degrés de liberté (d.d.l.) qu'on peut tenter de définir en considérant la figure 3.3 représentant un solide placé dans un repère orthonormé « R ». Les déplacements du solide peuvent se ramener à des translations suivant les axes X, Y, Z ou à des rotations autour de ces mêmes axes : le solide possède donc 6 d.d.l. Toute liaison avec un deuxième solide supprime des d.d.l. de l'un par rapport à l'autre. Pour un robot, la tâche à accomplir peut exiger moins de 6 d.d.l. et les effecteurs possèdent souvent leurs propres d.d.l.

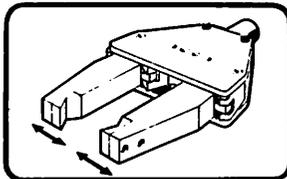
La figure 3.4 montre deux architectures de porteurs à 3 d.d.l.

Il est à remarquer qu'un robot peut posséder plus de degrés de mobilité que de d.d.l. indépendants.

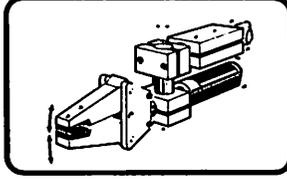
Les porteurs doivent déplacer une certaine charge à une distance donnée, aussi faut-il respecter un couple limite admissible. Les différents moments d'inertie conditionnent les vitesses de déplacement et par conséquent, les accélérations et décélérations supportables.

Les mouvements élémentaires de translation ou de rotation peuvent être réalisés avec une énergie pneumatique, hydraulique ou électrique et le choix des actionneurs est fonction des masses à manipuler, des vitesses de déplacement, de la précision souhaitée et de l'encombrement disponible.

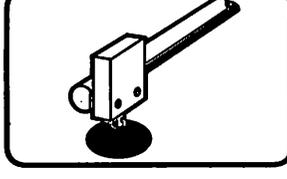
Les performances d'un robot dépendent en grande partie du poids, de la flexibilité et des jeux de fonctionnement des organes de transmission et réduction. Pour les robots à motorisation électrique deux directions se précisent : la première essaie de supprimer un ou deux étages de réduction en augmentant le couple à basse vitesse, la deuxième consiste à supprimer totalement le réducteur en réalisant des moteurs à entraînement direct, surtout depuis l'usage de moteurs à aimants permanents aux terres rares qui ont permis d'augmenter la puissance des moteurs tout en réduisant leur volume et en améliorant le comportement thermique.



**Main à 2 doigts mobiles à déplacement parallèle**  
 Cette main ne diffère de la précédente que par le déplacement parallèle des doigts.  
 Cette main peut être dans 3 positions par rapport à l'axe du bras :  
 - perpendiculaire à l'axe du bras  
 - parallèle à l'axe du bras  
 - dans l'axe du bras.



**Main à orientation variable**  
 Le système de montage de cette main possède 2 degrés de liberté qui permettent une inclinaison variable par rapport à l'axe du bras.  
 Il offre donc de nombreuses possibilités de réglage.

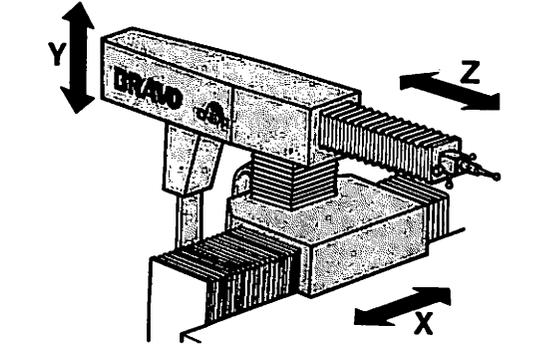


**Main ventouse pneumatique**  
 La dépression créée par une pompe à vide (venturi) permet de manipuler une pièce de surface lisse. La main pouvant recevoir plusieurs ventouses de tailles différentes, le poids de la pièce à manipuler détermine la taille de la ou des ventouses.

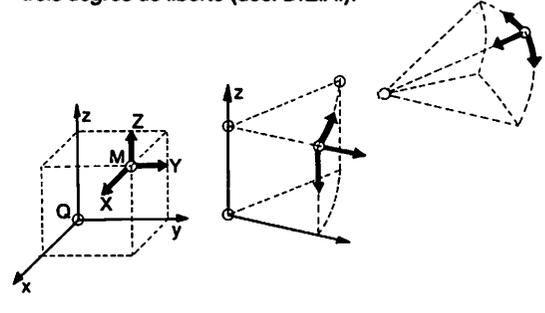


**Main ventouse électromagnétique**  
 Le champ magnétique créé par un électro-aimant permet de manipuler une pièce magnétique.  
 La main peut recevoir des électro-aimants de tailles différentes. Pour augmenter la capacité de transfert, la main peut recevoir plusieurs électro-aimants.

**3.1 Exemples d'effecteurs adaptables sur le manipulateur de la fig. 2.1 (doc. CLIMAX).**



**Exemple de robot de mesure à coordonnées cartésiennes avec trois degrés de liberté (doc. D.E.A.).**



**3.2 Système de coordonnées.**

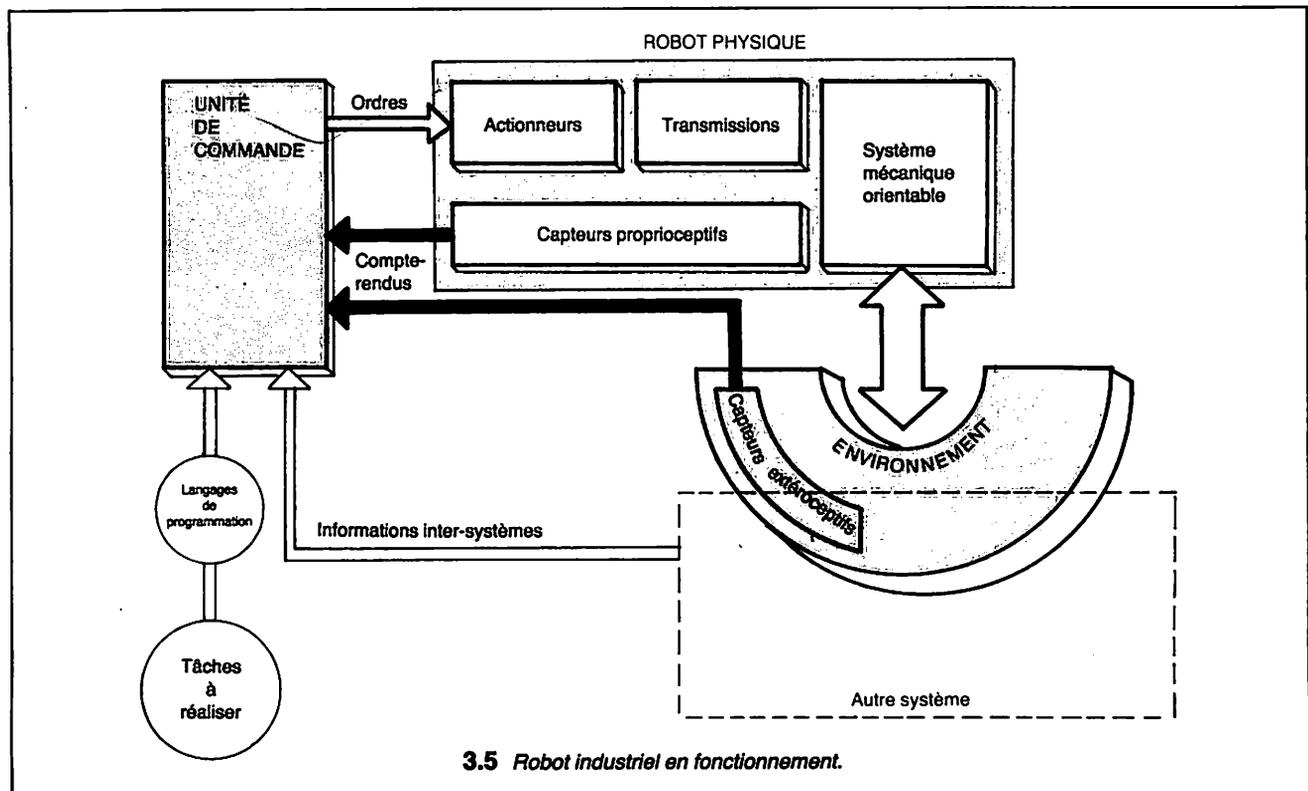
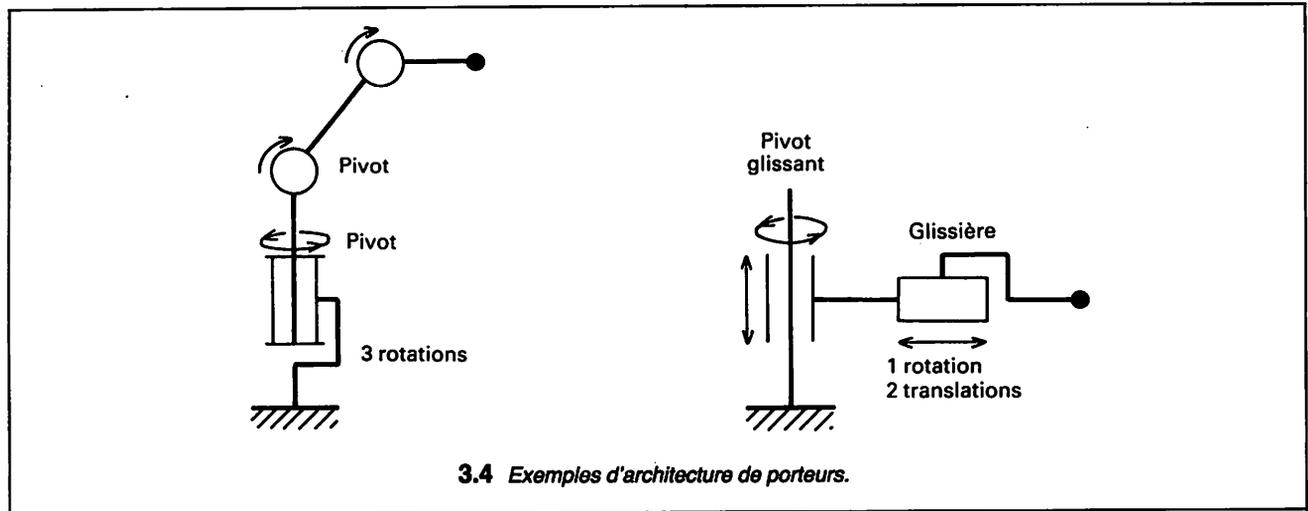
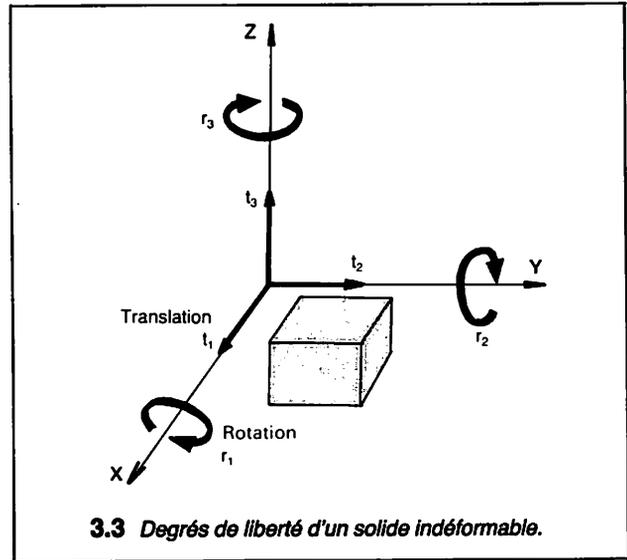
### 3. UNITÉ DE COMMANDE

Cette unité autorise le dialogue avec l'opérateur ou d'autres systèmes et elle élabore une commande appropriée des actionneurs assurant l'évolution du robot.

Elle est essentiellement constituée par :

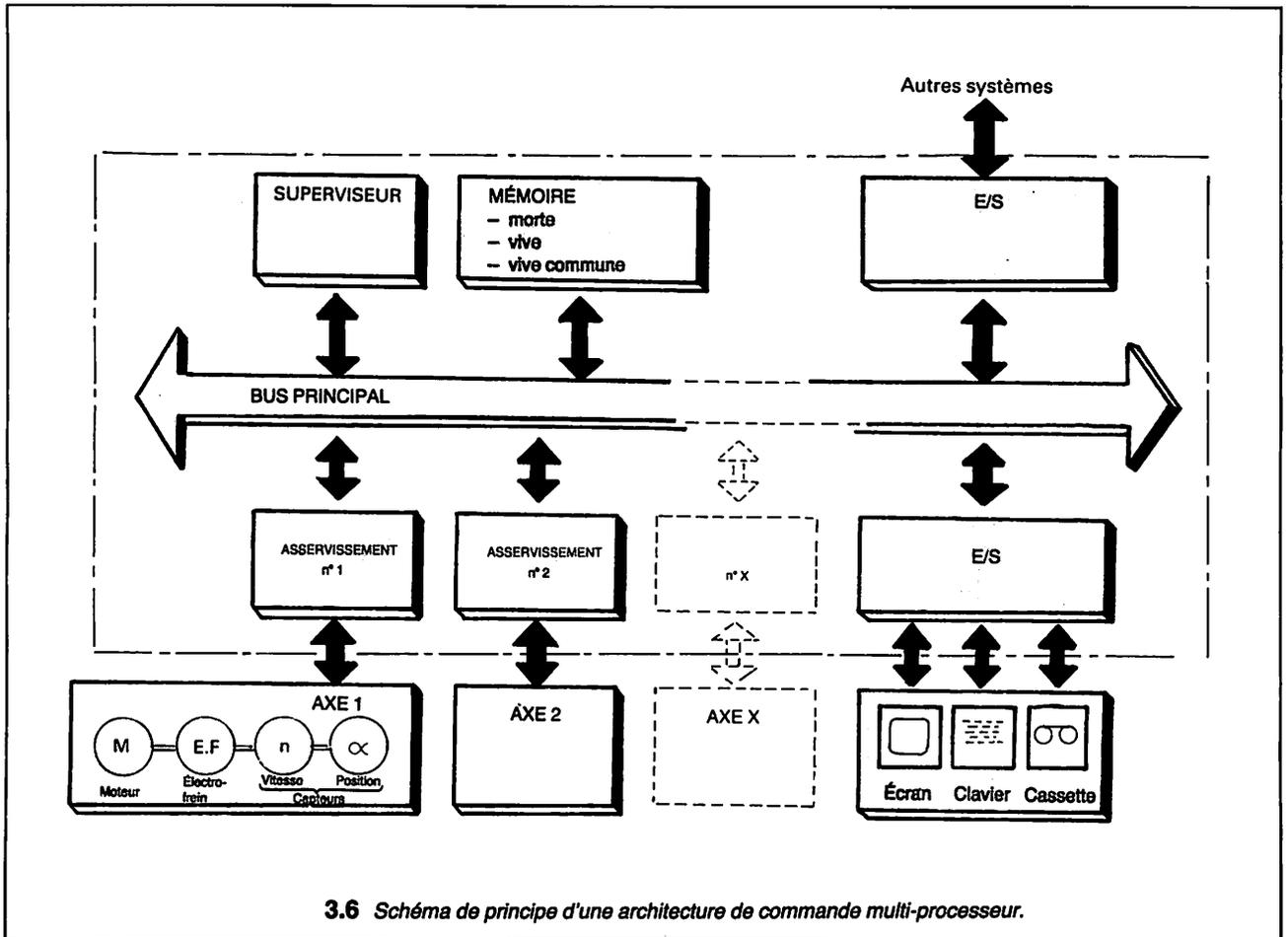
- un calculateur, véritable cerveau du robot ;
- des variateurs de vitesse et leurs alimentations ;
- des relayages et interfaces ;
- des protections ;
- des éléments de dialogue avec l'opérateur (écran, clavier, boîtier manuel, imprimante...).

Le calculateur possède dès le départ un modèle du robot, c'est-à-dire la connaissance de la relation entre l'ordre donné à un actionneur et l'action correspondante, un modèle de son environnement, à savoir la connaissance du volume atteignable et des obstacles à contourner, et enfin des instructions relatives aux tâches à exécuter et des algorithmes de stratégie. En cours de fonctionnement, les capteurs lui transmettent des informations proprioceptives indiquant l'état interne du robot et des informations extéroceptives précisant l'état de l'environnement (voir la fig. 3.5).



Pour répondre à la puissance de calcul demandée, deux architectures sont proposées : l'unité centrale unique et la structure modulaire. Dans la seconde solution, plus répandue, dite « architecture multiprocesseur » un bus principal permet de faire travailler plusieurs modules dotés ou non de microprocesseurs. Chaque module comporte les éléments qui lui permettent d'assurer sa fonction : mémoire, entrée/sortie, bus interne, circuits spéciaux, etc. Lorsque plusieurs modules ont à échanger des informations telles que des

résultats de calcul, ils accèdent par le bus principal à une zone mémoire vive commune (voir la fig. 3.6). Il est nécessaire, selon la tâche accomplie par le module, de leur définir des niveaux de priorité autorisant l'accès au bus principal en cas de besoin. La structure modulaire est facilement modifiable et pour implanter une fonction supplémentaire, la vision par exemple, il suffit d'ajouter une nouvelle carte électronique.



# 4. CAPTEURS ET ROBOTS

Les capteurs extéroceptifs permettent le contrôle de l'interaction entre le robot et l'environnement. On trouve de nombreux capteurs d'effort et de proximité mais aussi des dispositifs multicapteurs. Les capteurs tactiles, d'ouïe, de vision, sont en pleine évolution et présentent une grande diversité. Leur étude déborderait du cadre fixé à cet ouvrage.

Les capteurs proprioceptifs contrôlent le robot sans tenir compte de l'environnement et sont essentiellement utilisés pour les mesures nécessaires aux unités de motricité. Les capteurs de déplacement et de position ayant été présentés dans le thème 4, nous n'aborderons ici que les capteurs courants de vitesse, d'accélération, d'effort et de couple.

## 1. CAPTEURS DE VITESSE ANGULAIRE

Dans la plupart des cas la mesure d'une vitesse linéaire est ramenée à celle d'une vitesse angulaire aussi allons-nous davantage insister sur la présentation des capteurs de vitesse angulaire.

Outre les systèmes mécaniques ne présentant aucun intérêt pour la transmission à distance et le traitement des indications de vitesse, un classement usuel fait apparaître deux familles : les générateurs d'impulsions, produisant des informations à deux niveaux logiques et les générateurs tachymétriques, élaborant une grandeur électrique proportionnelle à la vitesse mesurée. Il est à noter que des convertisseurs autorisent le traitement analogique ou digital de chacune de ces sorties.

### 1° GÉNÉRATEURS D'IMPULSIONS

#### • Les générateurs d'impulsions électromagnétiques

Ils utilisent des capteurs électromagnétiques appelés aussi capteurs à réluctance variable, essentiellement composés d'une bobine enroulée autour d'un noyau en acier doux accolé à un aimant permanent.

La figure 4.1 montre le principe d'une roue phonique : une roue dentée en matériau ferromagnétique est accouplée à l'axe dont la rotation fait défilier alternativement des dents et des encoches devant le capteur. La variation d'entrefer « pièce tournante-noyau » provoque une variation de réluctance donc de flux magnétique induisant dans le bobinage une tension dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse de défilement. L'amplitude de la f. e. m.

induite croît avec la vitesse de rotation et à vitesse nulle, le signal émis est nul.

Les capteurs industriels à réluctance variable ne sont pas utilisables en dessous d'un seuil de fréquence ou de vitesse indiqué par le constructeur mais étant autogénérateurs, ils ne nécessitent pas d'alimentation.

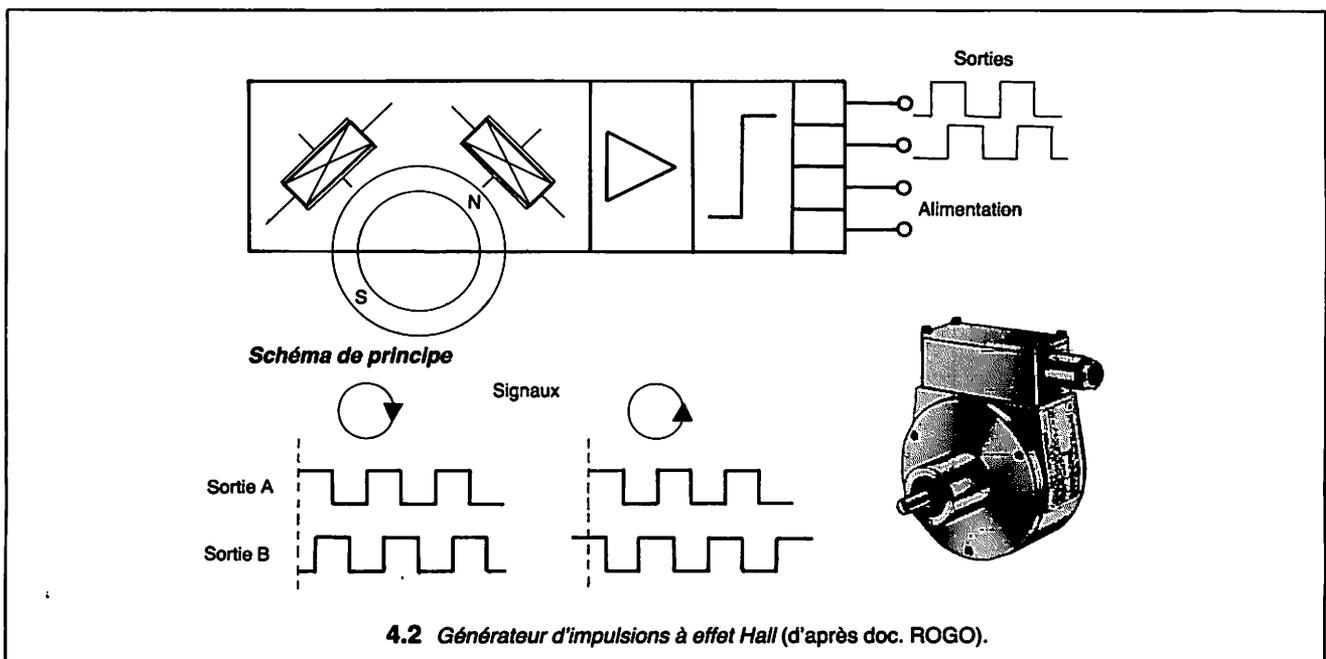
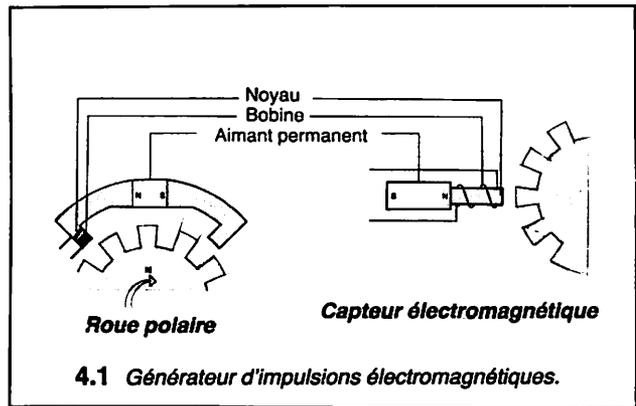
#### • Les générateurs d'impulsions inductifs

Les détecteurs inductifs présentés dans le thème 4 sont montés comme précédemment à proximité d'une roue dentée qui est parfois remplacée par un disque à trous.

Les détecteurs utilisés (type 3 fils) fournissent un signal de sortie dont l'amplitude est indépendante de la vitesse périphérique de l'élément en rotation. Ils peuvent détecter la proximité des pièces en régimes statique et dynamique permettant ainsi la mesure de très basses vitesses de rotation.

#### • Les générateurs d'impulsions à effet Hall

Ils utilisent des cellules Hall ayant la propriété de conversion d'un champ magnétique en grandeur électrique. Le générateur présenté sur la figure 4.2 se compose d'un aimant permanent entraîné en rotation par l'axe et dont les pôles magnétiques défilent devant des éléments Hall. Deux signaux de sortie déphasés de 90° permettent d'obtenir une discrimination du sens de rotation.

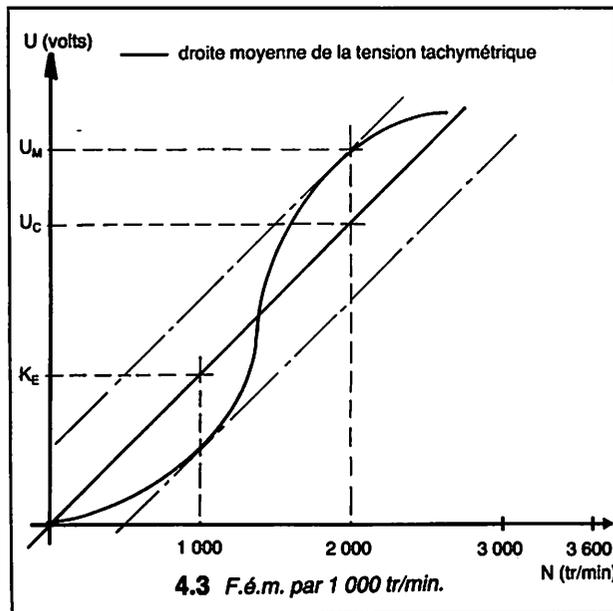


• **Les générateurs d'impulsions optoélectroniques**

Ces systèmes sont principalement constitués d'émetteurs et détecteurs optiques déjà présentés dans le thème 3 du tome 1. L'occultation périodique du faisceau lumineux est assurée soit par un obturateur tournant (ex. disque à fentes) dans le cas d'une transmission lumineuse directe soit par le passage de zones alternativement réfléchissantes et sombres dans le cas d'une transmission lumineuse réflex. Les codeurs optiques angulaires incrémentaux (ou relatifs) déjà vus dans le thème 4 sont des applications des principes énoncés précédemment. Il est à remarquer qu'ils peuvent assurer plusieurs fonctions simultanées selon leur nombre de voies. Une seule voie fournit une impulsion par incrément de rotation et donne les indications suffisantes à la mesure de la vitesse. Une deuxième voie génère une seconde forme d'onde en quadrature avec la précédente et permet la détermination du sens de rotation. Une troisième voie transmet une impulsion dite de référence par tour.

2° GÉNÉRATEURS TACHYMÉTRIQUES

Leur tension de sortie doit être proportionnelle à la vitesse de rotation de l'axe et les générateurs sont différenciés suivant la nature du courant fournie. La désignation « dynamo tachymétrique » correspond à la production d'un courant continu mais lorsque le courant généré est alternatif, on parle d'« alternateur tachymétrique ».

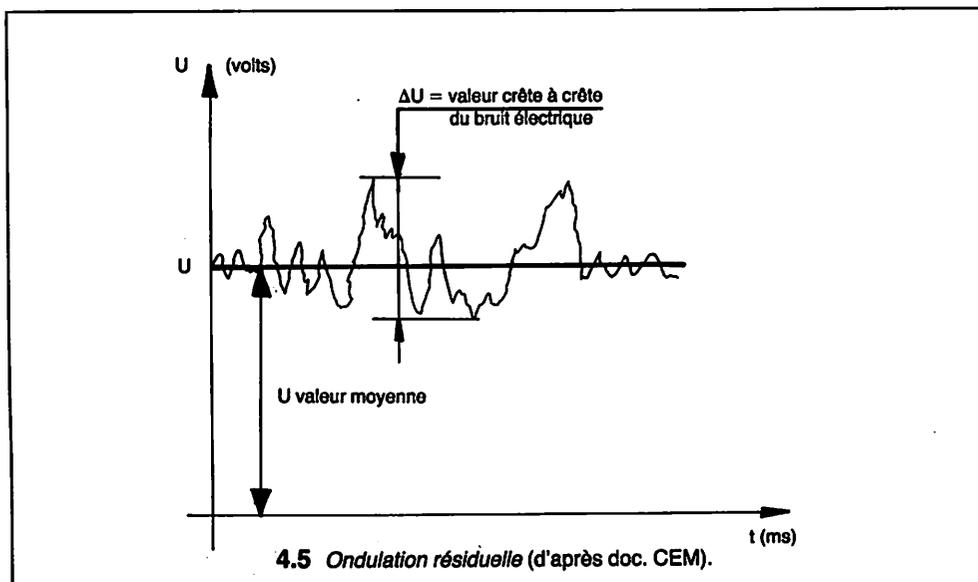
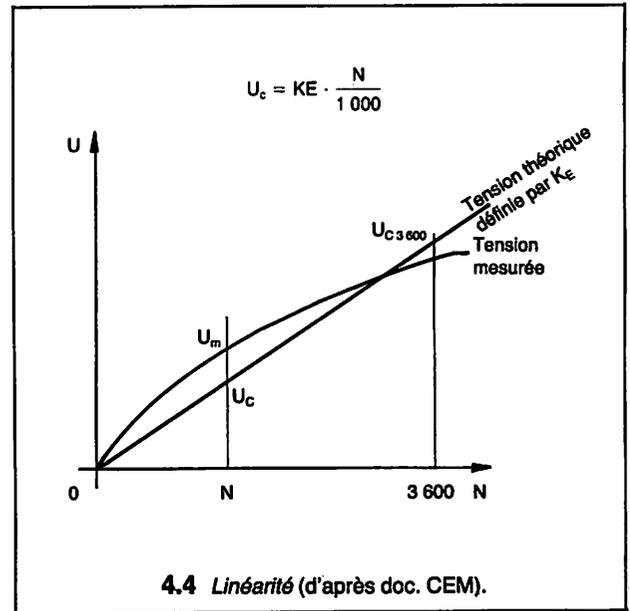


• **Dynamo tachymétrique**

Les génératrices sont surtout utilisées dans les systèmes asservis. Les caractéristiques électriques mécaniques et thermiques de la dynamo tachymétrique ne doivent pas perturber le fonctionnement de la boucle d'asservissement aussi nous citerons quelques caractéristiques aidant à évaluer les performances :

- **Tension de sortie (KE).** Elle exprime en volts la f. e. m. produite à une vitesse de rotation donnée, généralement à vide pour 1 000 tr/min (voir la fig. 4.3).
- **Tolérance bidirectionnelle.** Les pentes moyennes des courbes de tension tachymétrique pour les deux sens de marche ne sont jamais rigoureusement identiques. La tolérance bidirectionnelle caractérise l'écart rencontré entre deux valeurs KE et K'E, mesurées pour les deux sens de rotation. Elle est définie en % de KE par  $\frac{K'E - KE}{KE} \cdot 100$ .
- **Linéarité.** La tension mesurée  $U_m$  diffère légèrement de la tension calculée  $U_c$ . L'écart entre ces deux valeurs caractérise la linéarité réelle  $L_R$  ou celle rapportée à 3 600 tours par minute  $L_{3600}$  (fig. 4-4).  
A la vitesse N (à vide et à température constante) :

$$L_R(\%) = \frac{U_m - U_c}{U_c} \cdot 100 \text{ ou à } 3\,600 \text{ tr/min : } L_{3600} = \frac{U_m - U_c}{U_{c3600}} \cdot 100$$



- **Ondulation résiduelle.** Pour une vitesse de rotation stable, la tension théorique calculée a une valeur constante. En pratique, les imperfections et les problèmes de commutation de la dynamo créent des ondulations parasites qui viennent se superposer à la tension continue idéale (voir la fig. 4.5).

L'ondulation résiduelle exprimée en % est définie par :

$$B = \frac{\Delta u}{U} \cdot 100 \text{ ou } \Delta U \text{ représente l'écart de tension crête à crête}$$

et U la valeur moyenne. Cette modulation est mesurée à travers un filtre donné à une vitesse spécifiée.

- **Courant débité.** Un fonctionnement à vide permet de conserver une bonne linéarité mais le frottement balais-collecteur amélioré par le passage d'une certaine intensité (patine) réduit l'ondulation résiduelle. Il faut alors établir un compromis entre ces deux solutions à l'aide d'une résistance de charge élevée. Néanmoins, quand il est nécessaire de disposer d'un courant relativement élevé, les dynamos ont intérêt à présenter une très faible impédance interne.
- **Moment d'inertie du rotor.** Le moment d'inertie prend de l'importance lors d'accélération très élevées. D'autre part lorsque la dynamo tachymétrique est accouplée au moteur d'entraînement il existe une fréquence de résonance de torsion qui, dans le cas d'une boucle fermée, interdit la régulation si cette valeur de fréquence tombe dans la bande passante de l'amplificateur. Il faut alors modifier le montage pour décaler la fréquence mécanique.
- **Température.** Le faible courant débité par la dynamo ne provoque pas de problème thermique mais la température ambiante ou le dégagement de chaleur d'un moteur situé à proximité peuvent affecter le flux produit par les aimants inducteurs, soit diminuer la f. e. m. induite. Les constructeurs indiquent la valeur de dérive de la f. e. m. exprimée en % par °C.

Diverses réalisations font apparaître des bobinages de différentes formes : discoïdale à conducteurs lamellaires, tubulaire dite aussi en cloche à fils collés ou moulés dans la résine et toroïdale du type PAN Cake. Ces conceptions suivent la technologie des moteurs étudiés dans le thème 4.

### • Alternateurs tachymétriques

Les alternateurs délivrent une tension alternative sinusoïdale proportionnelle à la vitesse de l'arbre (à vide). Leur principe est identique aux alternateurs étudiés dans le tome 1. Généralement conçus sans bague collectrice, ils sont essentiellement constitués d'un rotor à aimant permanent et d'un stator moulé. Ils peuvent être équipés de plusieurs bobinages statoriques électriquement indépendants et le signal de sortie souvent redressé fait néanmoins intervenir la tension de seuil des redresseurs.

Enfin, mesurer la fréquence plutôt que la tension alternative délivrée permet de descendre aux très basses vitesses.

## 2. CAPTEURS DE VITESSE LINÉAIRE

Quand le mouvement linéaire n'est pas ramené à un mouvement circulaire, les capteurs utilisés sont très différents selon que les parcours des éléments mobiles sont limités ou non. Dans le cas d'un parcours limité, la mesure de vitesse de l'élément mobile peut se faire d'après le calcul  $v = \frac{\Delta \ell}{\Delta t}$ .

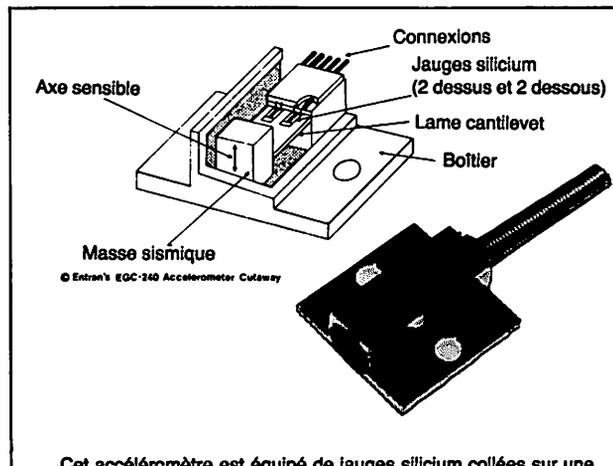
La plupart des capteurs de déplacement associés à un système électronique de calcul munis d'une base de temps précise conviennent alors pour la mesure de vitesse (vitesse de vérins, presses hydrauliques, etc.).

Dans le cas de parcours illimités, on fait essentiellement usage d'ondes telles que : laser, ultra-son, hyperfréquence, etc.

## 3. CAPTEURS D'ACCÉLÉRATION

La plupart de ces capteurs appelés accéléromètres ont été développés pour le contrôle de mouvements rectilignes. Ils sont fixés au corps mobile dont on veut mesurer l'accélération et sont constitués essentiellement de deux parties : un corps d'épreuve de masse m soumis à l'accélération  $\gamma$  et un capteur permettant de mesurer soit l'effet de la force  $F = m \cdot \gamma$  appliquée au corps d'épreuve soit la force elle-même.

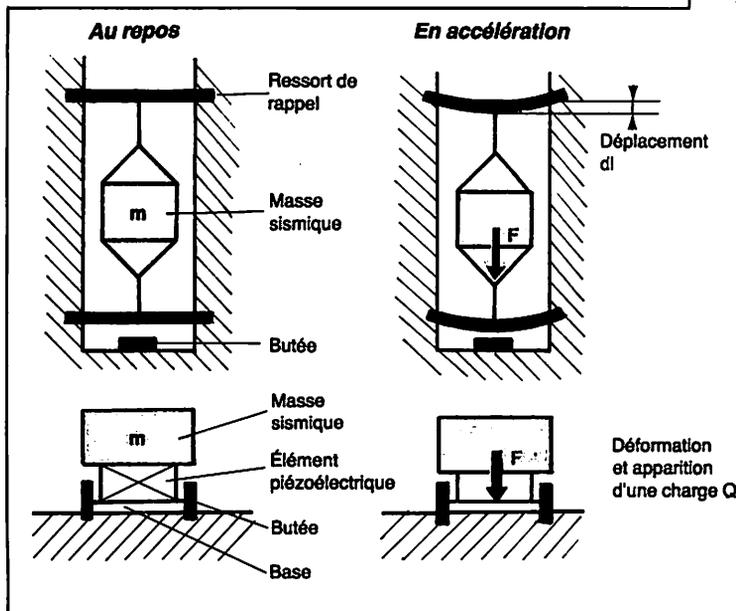
Comme le montre la figure 4.6 la mesure de l'accélération peut être ramenée à celle d'un déplacement (méthode potentiométrique, effet électrodynamique, mutuelle inductance, etc.) ou à celle d'une force (éléments piézoélectrique et piézorésistant, balance de force, etc.).



Cet accéléromètre est équipé de jauges silicium collées sur une lame cantilever, allant en butées lorsque l'accélération dépasse l'étendue de mesure de l'instrument, évitant ainsi sa détérioration. La sortie câble liée à l'accéléromètre par une spirale ressort permet d'éliminer un problème toujours délicat qui réside dans la tenue du câble en vibration à la sortie du capteur, ceci lui garantit ainsi une grande robustesse et une grande durée de vie.

Les caractéristiques essentielles de cet accéléromètre sont :

- Étendue de mesure de 50 à 5 000 g en 10 gammes
- Surcharge admissible : 10 fois l'étendue de mesure minimum (100 fois l'étendue de mesure en option)
- Sensibilité typique : 200 mV
- Alimentation : 15 volts
- Bande passante depuis le continu
- Plage d'utilisation en température de - 40 à + 120 °C
- Poids : inférieur à 10 grammes



4.6 Exemples d'effets relatifs à l'accélération (à gauche). Accéléromètre miniature à butées mécaniques (en haut).

#### 4. CAPTEURS DE FORCE

Un capteur de force comprend un corps d'épreuve qui, sous l'action de la force à mesurer, subit des contraintes et déformations (voir les figures 4.7 et 4.8).

Celles-ci sont transformées, grandeurs électriques, selon différents principes qui sont à l'origine du classement proposé.

##### 1° CAPTEURS A VARIATION DE RÉSISTANCE

La méthode potentiométrique et les méthodes extensiométriques sont préconisées.

##### • Capteur à potentiomètre

La déformation d'un ressort dynamométrique est transmise au curseur de la résistance variable d'un montage potentiométrique. Ce capteur simple permet d'économiser un amplificateur mais il présente une usure liée aux frottements du curseur et ses mesures sont limitées aux phénomènes à variation lente.

##### • Capteur à jauge de contrainte métallique

Dans une jauge métallique, la variation de résistance est liée à une modification dimensionnelle.

Considérons un fil en métal de résistivité  $\rho$ , de longueur  $\ell$  et de diamètre  $d$ .

Sa résistance  $R$  a pour expression :

$$R = \rho \frac{\ell}{S} = \rho \cdot \frac{4\ell}{\pi d^2}$$

Un allongement  $\Delta\ell$  provoque une variation de résistance  $\Delta R$  et en l'absence de perturbation thermique, la variation relative de résistance peut s'écrire :

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \frac{\Delta\ell}{\ell}$$

dans laquelle  $K$  représente un coefficient appelé facteur de jauge qui est pour la plupart des métaux indépendant de  $\frac{\Delta\ell}{\ell}$  (si l'allongement n'est pas trop élevé).

EFFORT	MODÈLE	MESURE
FLEXION		Contrainte ou déformation
TRACTION COMPRESSION		//
TRACTION		Fréquence de vibration
COMPRESSION		Contrainte ou déformation

**4.7 Exemples de corps d'épreuves.**

Deux technologies exploitent le principe énoncé : des jauges de contrainte à trame peuvent être collées sur le corps d'épreuve dont on veut mesurer la déformation (voir la fig. 4.9), d'autres sont réalisées à l'aide d'un fil résistant tendu en précontrainte entre deux supports.

##### • Capteur à jauge de contrainte piézo-résistive (à semi-conducteur)

La déformation subie par une jauge piézo-résistive provoque une variation de résistivité.

La variation relative de résistance a pour expression :

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_{\ell} \cdot \delta_{\ell} + \pi_t \cdot \delta_t$$

dans laquelle :  $\pi_{\ell}$  = coefficient de piézo-résistivité longitudinal

$\pi_t$  = coefficient de piézo-résistivité transversal

$\delta_{\ell}$  = contrainte appliquée longitudinale

$\delta_t$  = contrainte appliquée transversale

##### 2° CAPTEUR A VARIATION DE MUTUELLE INDUCTION

Des capteurs de petits déplacements travaillant en « comparateur électrique » mesurent les déformations d'un corps d'épreuve élastique soumis aux forces à mesurer. Les transformateurs différentiels sont très utilisés. La figure 4.10 donne le principe d'une chaîne à variation de mutuelle induction.

##### 3° CAPTEUR A EFFET PIÉZO-ÉLECTRIQUE

Certains cristaux se polarisent électriquement lorsqu'ils sont soumis à des contraintes mécaniques convenablement orientées. L'effet inverse montre que ces mêmes éléments placés dans un champ électrique se déforment sous l'action de forces internes.

L'effet piézo-électrique direct est utilisé pour réaliser un grand nombre de capteurs. Considérons la figure 4.11 représentant une lame taillée dans un cristal de quartz. Si l'on applique une force parallèle à l'axe OX ou OY, des charges électriques de signes opposés apparaissent sur les faces normales à OX ou OY, telles que :

$$Q_x = K \cdot F_x \quad \text{ou} \quad Q_y = K \cdot F_y \frac{L}{\ell}$$

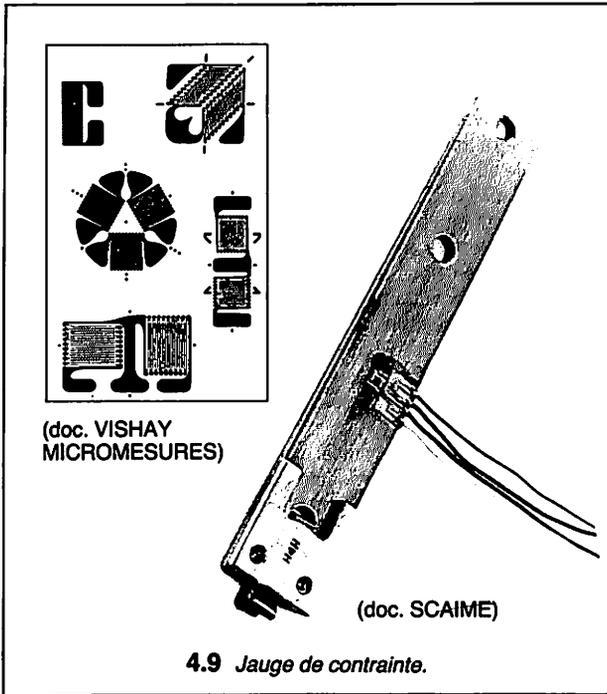
où  $K$  représente le module ou la constante piézo-électrique.

Ce capteur se caractérise par une très grande raideur et de bonnes caractéristiques thermiques.

Ses caractéristiques essentielles sont :

- Étendue de mesure de 1 à 150 daN en 8 gammes
- Surcharge admissible : 2 fois l'étendue de mesure
- Sensibilité : 100 mV pour l'étendue de mesure
- Alimentation : 15 volts continu
- Linéarité : 0,5 % de l'étendue de mesure
- Hystérésis : 0,2 %
- Plage d'utilisation en température - 40° à + 120 °C

**4.8 Capteur de force miniature (doc. ENTRAN).**



Le sens des polarisations et le signe des charges s'inversent en même temps que celui des forces. Les charges électriques sont recueillies à l'aide d'électrodes et comme le montre la figure 4.12 le capteur est alors équivalent à un générateur de charge de grande capacité interne. Il est à noter qu'au point de Curie la structure cristalline change et la polarisation disparaît. Deux catégories de matériaux piézo-électriques sont employés : les cristaux naturels tels que le quartz et les céramiques polycristallines.

**4° CAPTEUR A CORDE VIBRANTE**

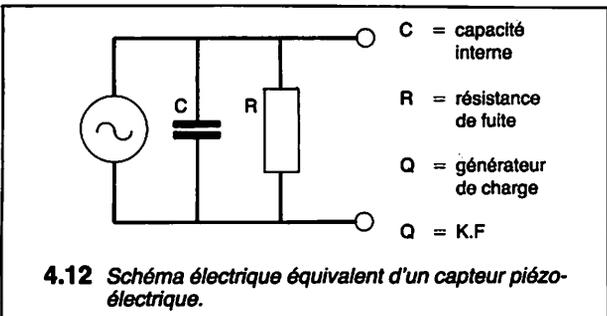
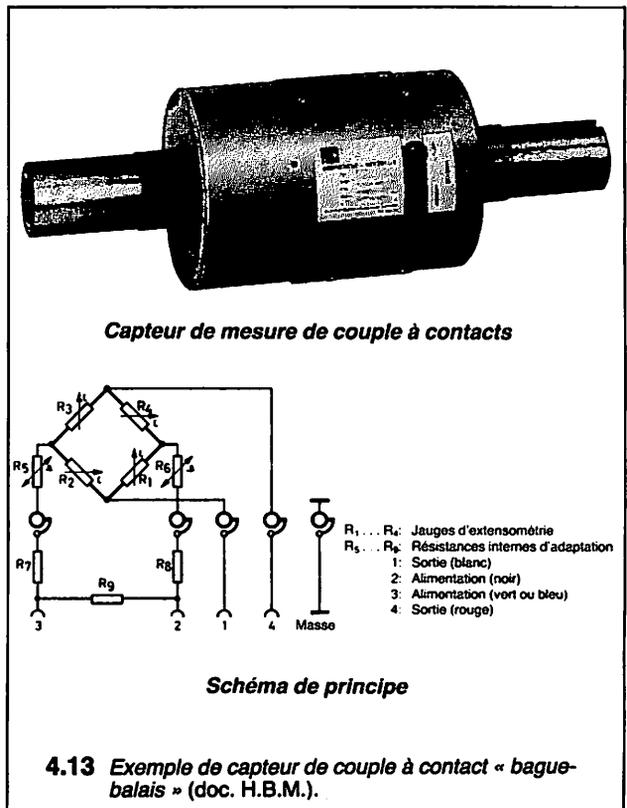
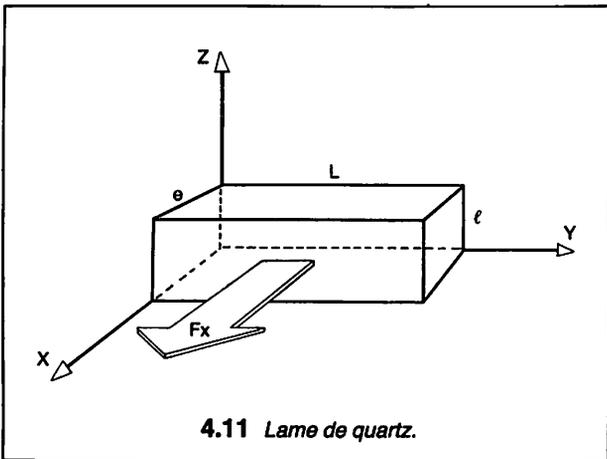
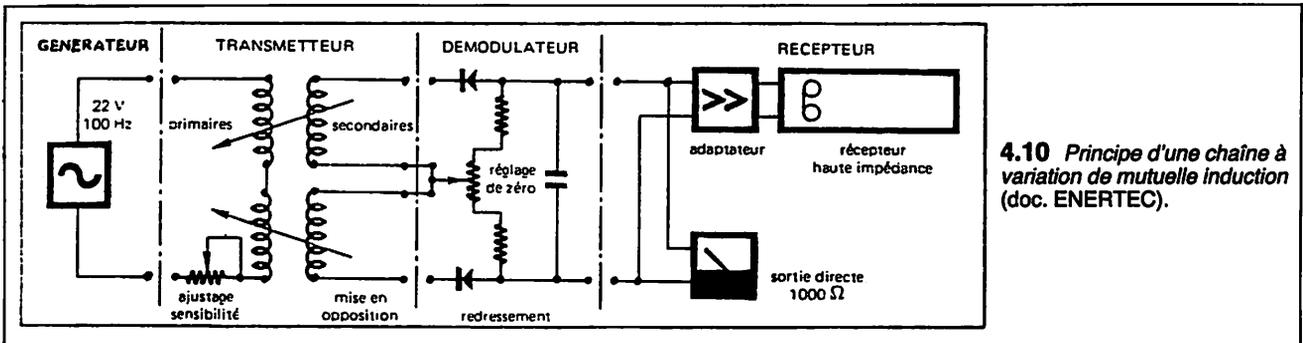
Pour réaliser ce capteur une corde vibrante est fixée à l'intérieur d'un corps d'épreuve entretenu en vibration à sa fréquence propre. Lorsqu'une force est appliquée, la tension de la corde varie, entraînant une modification de la fréquence des oscillations que l'on peut mesurer.

**5. CAPTEURS DE COUPLE**

**1° CAPTEURS DE MESURE DE COUPLE A CONTACTS**

**• Principe de mesure et exemple de construction (fig. 4.13)**

Les jauges d'extensométrie sont appliquées sur le corps de mesure de telle sorte qu'elles soient déformées par le couple à me-



sur. Elles subissent ainsi une variation de résistance. Montées en pont de Wheatstone, elles délivrent un signal proportionnel au couple. Si les jauges sont alimentées par une tension proportionnelle à la vitesse de rotation, le signal de mesure sera proportionnel au produit de la vitesse et du couple, donc à la puissance. Cinq paires de balais, solidaires du boîtier, raccordées sur un connecteur, et cinq bagues solidaires du rotor servent à amener la tension d'alimentation sur les jauges, de prélever le signal de mesure et d'effectuer une liaison de masse entre rotor et stator. Un système très simple permet de relever et d'abaisser les balais sur les bagues pendant la rotation.

## 2° CAPTEURS DE COUPLE SANS COLLECTEUR

### ● Principe de fonctionnement et exemple de construction (fig. 4.14)

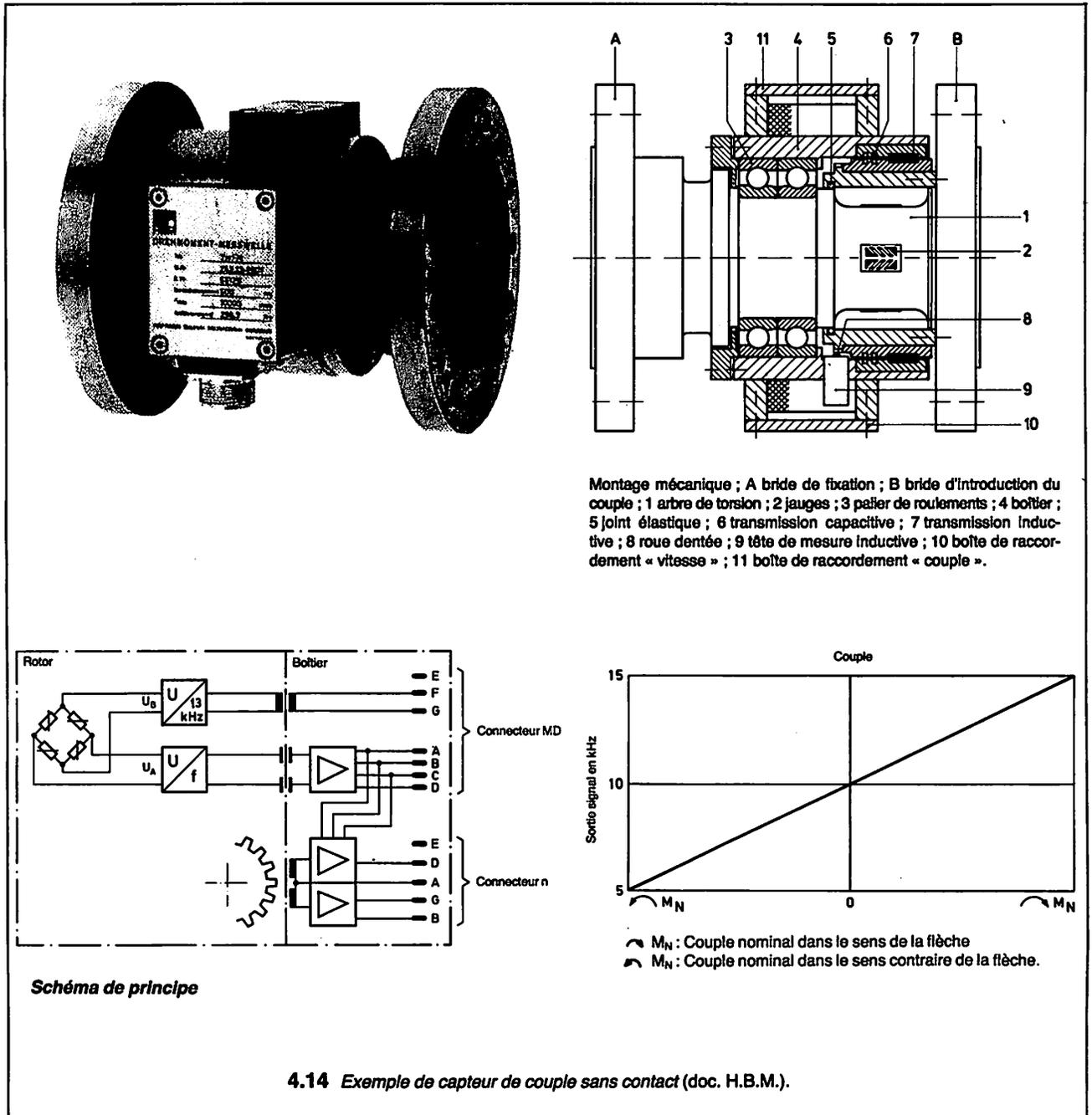
La mesure du couple est basée sur le principe des jauges. L'alimentation des jauges est transmise inductivement sur l'arbre où elle est redressée et stabilisée. Le signal de sortie du pont de jauges

est transformé en pulsation de fréquence modulée par un convertisseur tension-fréquence et transmise de manière capacitive de l'arbre tournant (Rotor) vers la partie fixe (stator). Le signal est ensuite amplifié dans un préamplificateur pour être traité ensuite par l'unité convertisseur de couple.

Cette dernière transforme les impulsions en tension continue proportionnelle au couple mesuré.

Pour la mesure de la vitesse et du sens de rotation, les capteurs de couple sont équipés d'un capteur de vitesse. Ce capteur possède deux têtes de mesure inductives. Ces dernières délivrent chacune 30 impulsions décalées de  $\pi/2$  par tour. Sur un point du connecteur arrivent 60 impulsions par tour ce qui permet d'être en lecture directe du nombre de tours par minute. Le signal de mesure est ensuite préamplifié pour être traité dans l'unité convertisseur de vitesse qui transforme les impulsions en tension continue proportionnelle à la vitesse, positive ou négative en fonction du sens de rotation.

Au moyen d'une unité de multiplication dont les entrées sont branchées sur les sorties des modules convertisseurs (de couple) et (de vitesse) il sera possible de mesurer la puissance.



# 5. EXPLOITATION DE ROBOT

## 5.1. PROGRAMMATION DES ROBOTS

La mise en mémoire des instructions régissant les différents cycles de travail fait appel à différentes méthodes que l'on peut classer en deux familles : la programmation sur site, dite « on-line », nécessitant l'utilisation du robot et de son unité de commande et la programmation hors ligne dite « off-line » laissant disponible l'ensemble robot-unité de commande.

### 1° PROGRAMMATION « EN LIGNE » (ON-LINE)

La méthode la plus employée est la programmation par apprentissage (teach-in). Plusieurs procédures de mise en mémoire du programme sont utilisées :

- **Apprentissage manuel direct**

L'opérateur guide la trajectoire de l'effecteur du robot. Lorsque la masse à manipuler est trop importante, des dispositifs d'assistance musculaire facilitent le travail.

- **Apprentissage manuel par syntaxeur**

L'opérateur agit sur un système mécanique articulé qui télécommande le robot. Les syntaxeurs servent à traduire les mouvements d'un organe maître en mouvement robot devenu esclave. Ils se présentent sous diverses formes (bras maître, poignée de commande, pantin) et possèdent en général les mêmes degrés de liberté que le robot.

- **Apprentissage par pupitre de commande**

Un boîtier équipé de boutons poussoirs permet de commander les différents déplacements. Cette procédure est souvent associée à l'apprentissage précédent par l'adjonction d'une poignée de commande.

### 2° PROGRAMMATION « HORS LIGNE » (OFF-LINE)

La programmation par apprentissage pour les petites et moyennes séries ou pour les tâches multiples complexes présente l'inconvénient des temps de programmation élevés qui diminuent d'autant la rentabilité du robot. D'autre part, des applications utilisent des capteurs et périphériques (système de vision, etc.) qui doivent avoir une influence sur l'exécution du programme et pour lesquels la programmation par apprentissage ne suffit plus. Les constructeurs proposent des robots programmables par langages et ouvrent une voie : la génération de programmes par simulation sur poste C.F.A.O. (Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur).

Le langage de commande doit être facile d'emploi, permettre des modifications et mises au point rapides et avoir des possibilités d'évolution à un moindre coût (frais importants de programmation).

## 5.2. CARACTÉRISTIQUES DE TRAVAIL

Pour automatiser une tâche, il faut déterminer la rentabilité attendue en tenant compte notamment des performances du robot et des moyens (humains et matériels) nécessaires à sa mise en place, son exploitation et sa maintenance. Les performances d'un robot dépendent de diverses caractéristiques développées ci-après.

- **Volume de travail**

C'est le volume défini par l'ensemble des points accessibles par l'effecteur. Il dépend des différentes courses, c'est-à-dire des déplacements linéaires et angulaires.

- **Charge utile transportable**

Les couples développés par les actionneurs varient avec la configuration du robot, aussi les constructeurs doivent-ils fournir la charge utile transportable dans tout le volume de travail ; la charge maximale indiquée n'étant pas toujours manipulable dans tout ce volume.

- **Vitesse de travail**

Elle conditionne en partie le temps mis pour exécuter une tâche. Les constructeurs fournissent pour chaque axe les vitesses maximales de translation ou de rotation.

- **Précision de positionnement**

Elle indique la précision avec laquelle on peut atteindre une configuration du robot en partant d'une position différente. Il convient de la distinguer de la précision de répétabilité qui caractérise les écarts de positionnement enregistrés lors d'opérations successives identiques.

- **Fiabilité**

Deux catégories de pannes peuvent se présenter : la dégradation des performances ou l'arrêt total du robot. La fiabilité peut s'exprimer à l'aide de diagrammes fréquentiels signalant la fréquence des pannes liée à la durée de vie du système.

- **Liaison de synchronisation**

Le nombre de possibilités de liaisons ou de dialogues avec d'autres machines et processus est un critère déterminant des performances.

# 6. PRÉSENTATION D'UN ROBOT UTILISÉ POUR LE SOUDAGE ÉLECTRIQUE PAR POINTS

Le robot choisi est de type polyvalent, conçu pour les grandes cadences en milieu industriel. Ses six axes à actionneurs électriques lui permettent de manipuler jusqu'à 100 kg (voir la fig. 6.1).

La structure mécanique offre une large enveloppe de travail, des mouvements rapides, un positionnement précis.

- Nombre d'axes : 6 (fig. 6.2).
- Actionneurs : servomoteurs à courant continu.
- Chaîne cinématique : pignons, couronne dentée, vis à billes.
- Codeurs : optiques incrémentaux.
- Charge manipulable : 60 kg, en exploitation à vitesse maximale ; jusqu'à 100 kg, à vitesse réduite.
- Répétabilité :  $\pm 0,3$  mm.
- Freins électromagnétiques sous tous les axes.
- Poids : 2 000 kg.

## 1. UNITÉ DE COMMANDE

L'armoire de commande comporte deux sous-ensembles principaux (voir fig. 6.3) :

- **L'électronique de commande numérique**, à structure multi-microprocesseurs assurant la précision des mouvements du robot et permettant de gérer des environnements très complexes. Le transfert automatique sur mémoire à bulles assure la sauvegarde des informations, même en cas de coupure de secteur. De plus, la sauvegarde sur cassette est possible.
- **L'électronique de puissance**, constituée de 6 variateurs de vitesse à découpage à transistors, assurant un excellent rendement.
- Un pupitre mobile, relié à l'armoire de commande par un câble souple regroupe :
  - un écran à cristaux liquides,
  - un clavier alphanumérique, permettant la commande des axes et la programmation des tâches du robot (trajectoires et instructions associées).

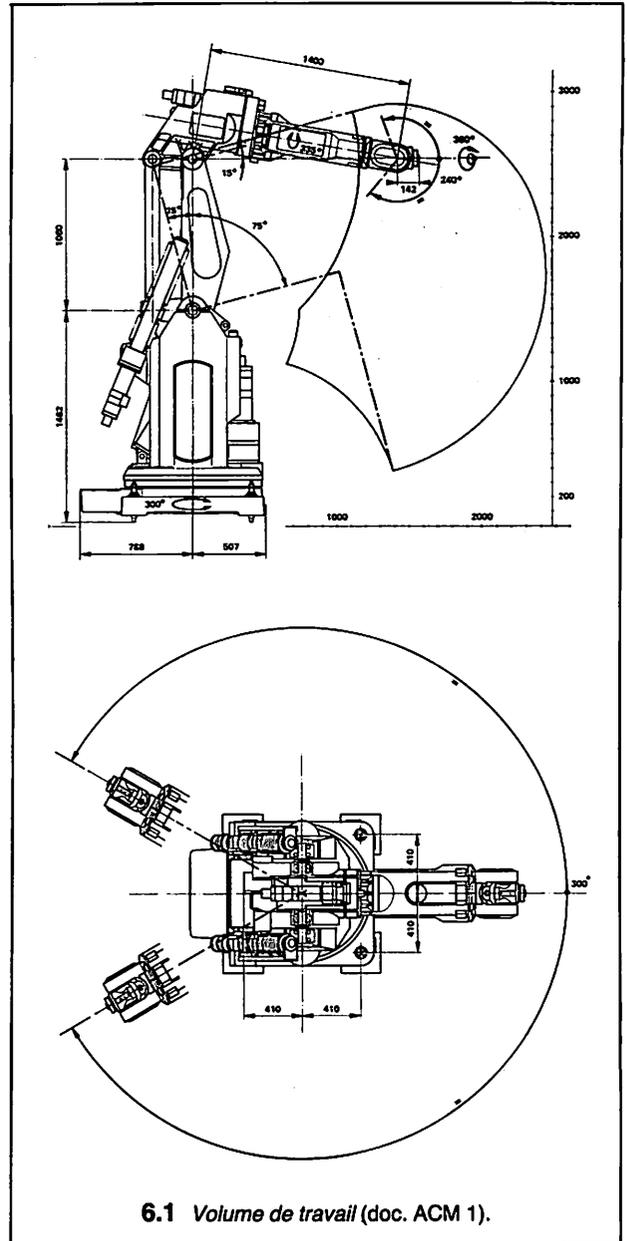
## 2. ALIMENTATION GÉNÉRALE DE L'INSTALLATION

Courant électrique : 220/380 V triphasé + 10 %, - 15 % de 48 à 62 Hz - 12 kVA.

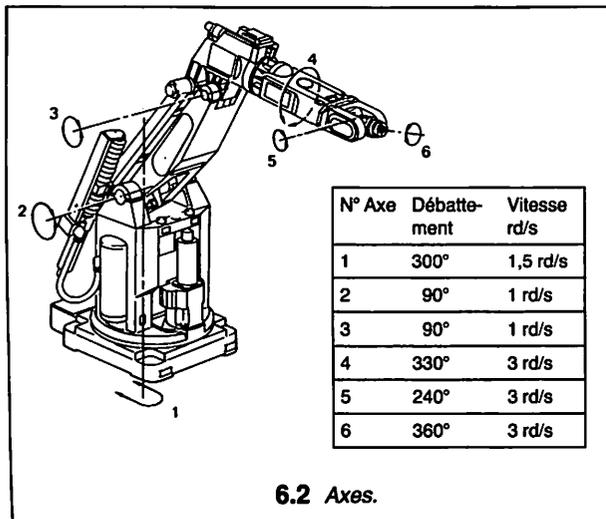
Air comprimé.

## 3. OUTIL DE TRAVAIL

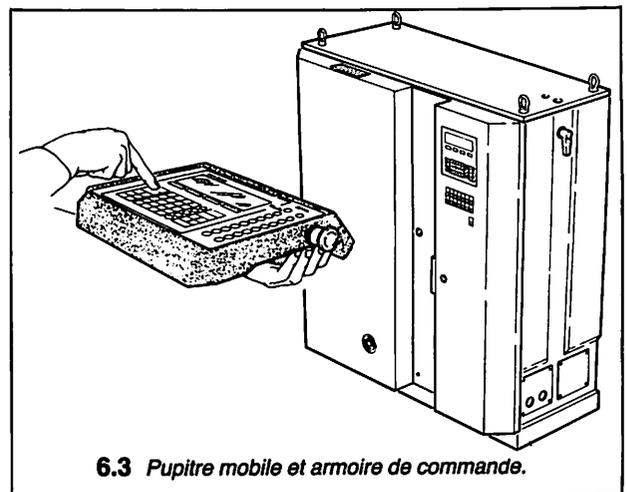
L'outil de travail est, pour un robot de soudage par points, une pince à souder présentée au chapitre 7, paragraphe 7.



6.1 Volume de travail (doc. ACM 1).



6.2 Axes.



6.3 Pupitre mobile et armoire de commande.

# 7. PROCÉDÉ DE SOUDAGE PAR RÉSISTANCE DIT « PAR POINTS » ET PRÉSENTATION DE L'ÉQUIPEMENT

## 1. GÉNÉRALITÉS

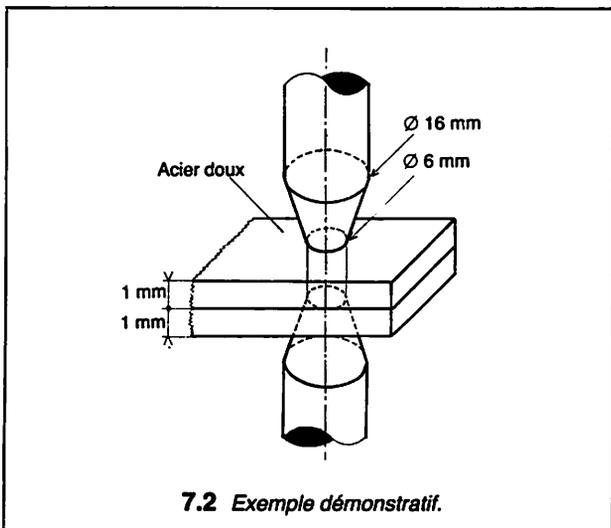
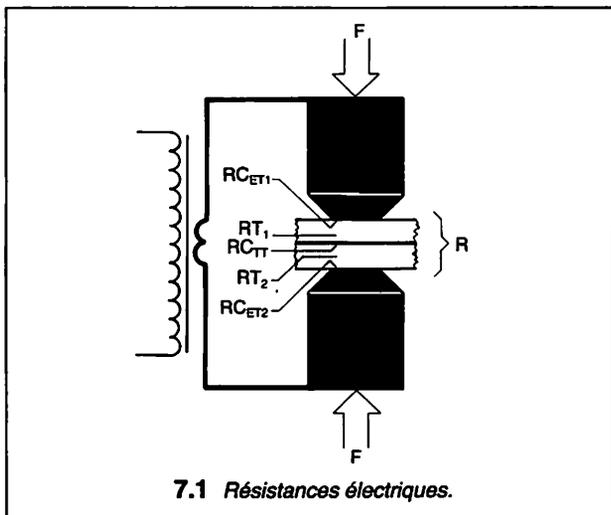
L'opération de soudage consiste à assurer l'assemblage continu et permanent d'éléments solides pouvant être de natures différentes. Le substantif « soudure » définit l'assemblage réalisé.

Le soudage électrique par résistance peut être défini comme la réalisation d'une soudure exécutée avec pression, sans apport de métal extérieur, utilisant pour mode de chauffage l'effet thermique d'un courant électrique traversant l'assemblage.

## 2. PRINCIPE DU SOUDAGE PAR POINTS

Pour exécuter une soudure, on utilise les actions simultanées d'une pression et d'un chauffage. Les pièces à assembler sont serrées entre deux électrodes exerçant une pression déterminée puis l'application d'une tension laisse passer un courant électrique de forte intensité (quelques kA à quelques dizaines de kA). La figure 7.1 montre que ce courant est limité par différentes résistances :

- les résistances de contact électrode-tôle  $RC_{ET1}$  et  $RC_{ET2}$  qui dépendent de l'état de surface et de la nature des tôles, de la forme



- et de la nature des électrodes et surtout, de l'effort appliqué ;
  - les résistances des tôles  $RT_1$  et  $RT_2$  influencées par la nature et l'épaisseur des tôles ;
  - la résistance de contact entre tôles  $RC_{TT}$  fonction de la nature et de l'état de surface des tôles ainsi que de l'effort de serrage.
- La résistance totale  $R$  varie avec l'élévation de température due au passage du courant. En valeur instantanée, la loi de Joule est applicable et l'échauffement en chaque point est proportionnel à la résistance ohmique.

$$W_J = \eta \int_0^t R \cdot i^2 \cdot dt \quad \text{soit} \quad Q_{cal} = 0,24 \cdot \eta \int_0^t R \cdot i^2 \cdot dt$$

$\eta$  représente le rendement tenant compte des pertes par rayonnement, convection et conduction.

## 3. EXEMPLE DÉMONSTRATIF

A l'aide d'un exemple tracé sur la figure 7.2, justifions la localisation du point de fusion.

### 1° DÉTERMINATION DES RÉSISTANCES (A FROID)

#### • Résistances des tôles

On admet que le courant traversant les tôles ne circule que dans la partie cylindrique comprise entre les deux électrodes.

$$RT_1 = RT_2 = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad \text{avec} \quad \rho = 16 \mu\Omega \cdot \text{cm}$$

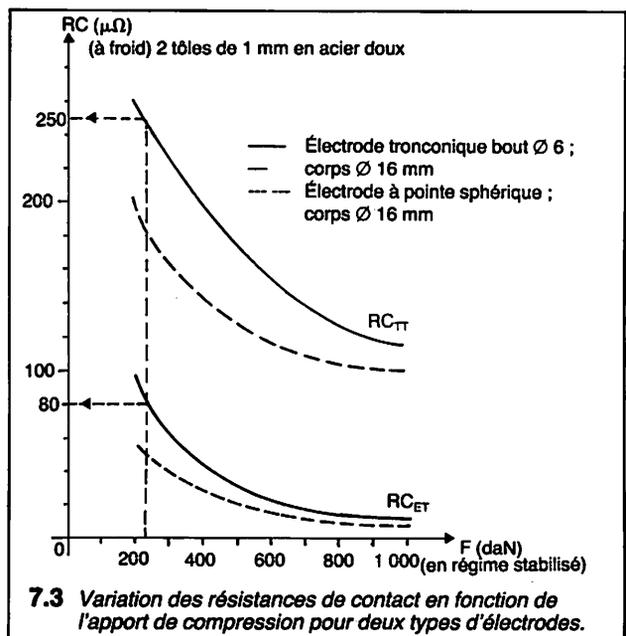
$$\text{soit} \quad RT_1 = RT_2 = 16 \cdot \frac{0,1}{0,28} = 6 \mu\text{m}$$

#### • Résistances de contact

Pour un effort de 230 daN les graphes de la figure 7.3 permettent de relever les valeurs suivantes :

$$RC_{ET1} = RC_{ET2} = 80 \mu\text{m}$$

$$RC_{TT} = 250 \mu\text{m}$$



## 2° DÉDUCTION

La résistance à froid  $RC_{TT}$  du contact tôle-tôle est la plus élevée, c'est donc à cet endroit qu'aux premiers instants du passage du courant l'échauffement sera le plus important.

Mais comme le montre la figure 7.4,  $RC_{TT}$  diminue rapidement avec l'élévation de température. La brève mais importante quantité de chaleur dégagée par  $RC_{TT}$  a engendré dans le voisinage une augmentation locale de la résistance des tôles (coefficient de température positif) qui, selon la loi de Joule, va accentuer l'échauffement de cette zone.

## 3° CONCLUSION

Pour obtenir la formation d'un noyau de métal fondu malgré les pertes thermiques dans les électrodes, les pièces et l'air ambiant, il faut que la quantité de chaleur dégagée d'abord au contact des tôles ( $RC_{TT}$ ) puis dans la partie située au voisinage du contact soit suffisante pour atteindre la température de fusion (fig. 7.5).

## 4. DÉCOMPOSITION D'UNE OPÉRATION DE SOUDAGE PAR POINTS

La figure 7.6 montre les différentes étapes de cette opération métallurgique.

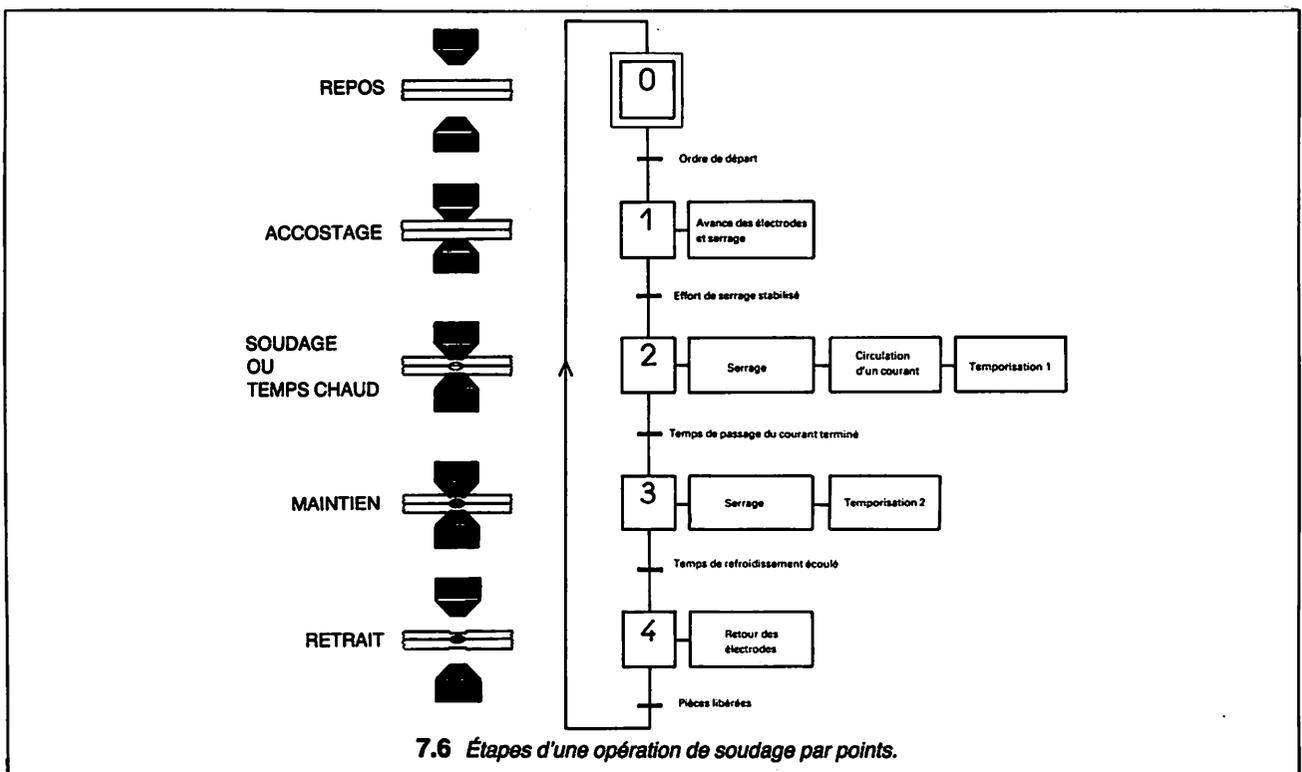
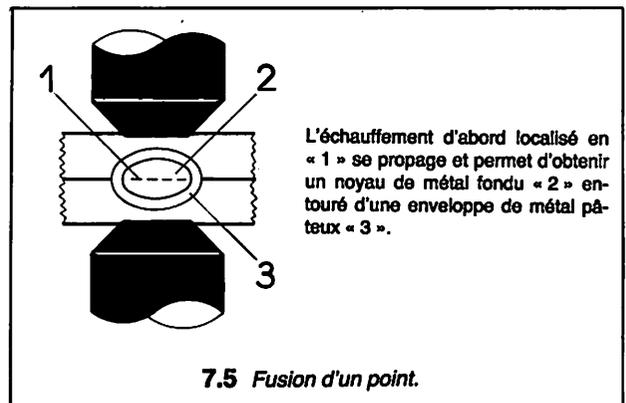
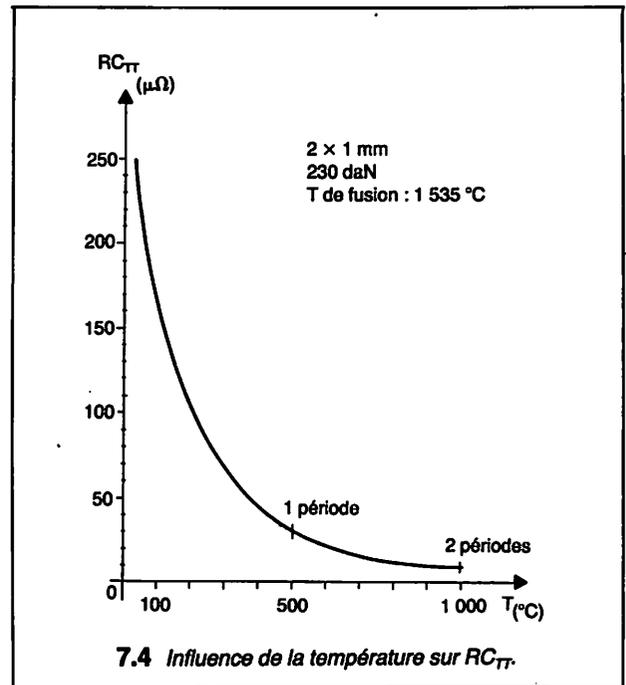
Le rôle de l'effort de compression assurant le serrage varie suivant les étapes.

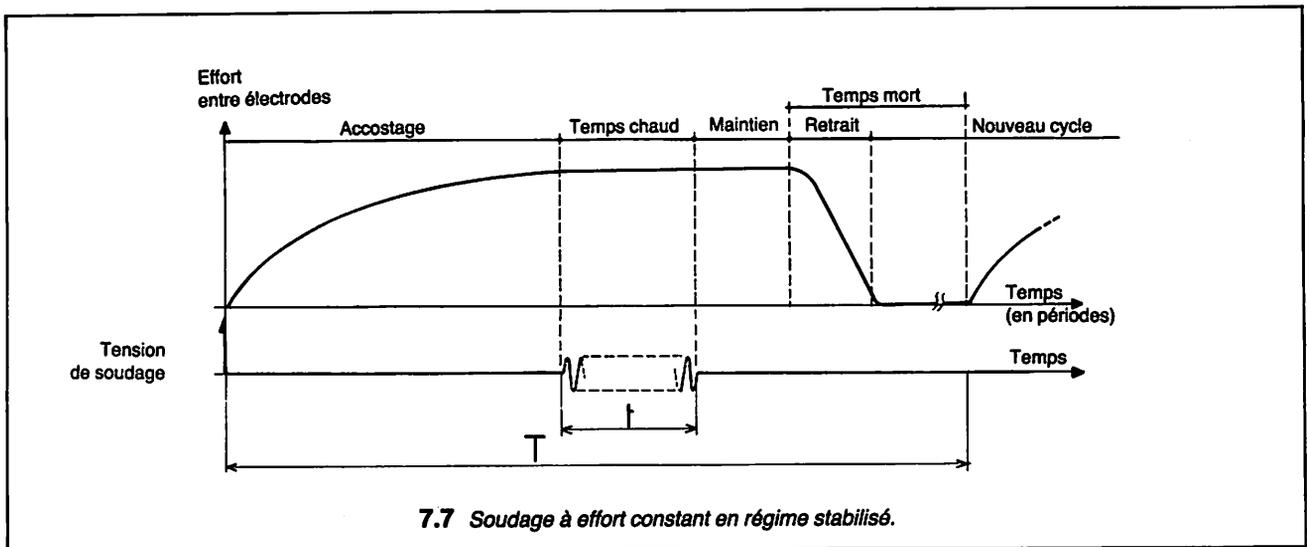
Pendant l'accostage, il doit assurer un rapprochement rapide des électrodes puis vaincre les réactions élastiques des pièces. L'effort stabilisé doit être assez élevé pour obtenir des résistances électrodes-tôle faible mais il ne doit pas être excessif pour conserver à la résistance tôle-tôle sa valeur prépondérante.

Pendant la phase de soudage, l'effort permet de maintenir en place le noyau fondu en évitant la destruction de l'enveloppe pâteuse. Il devrait être plus modéré qu'à l'étape précédente.

Pendant le maintien, le noyau se cristallise. Une augmentation de l'effort affine le grain du métal et élève sa résistance.

Les constructeurs présentent des machines à effort modulé et d'autres à effort constant en régime stabilisé dont la valeur est un compromis entre les trois valeurs énoncées précédemment. Voir fig. 7.7.





## 5. MOYENS D'ACTION SUR LA QUANTITÉ DE CHALEUR PRODUITE

La formule  $Q = 0,24.R.I^2.t$  fait apparaître trois grandeurs : la résistance, l'intensité et le temps.

### 1° RÉSISTANCE R

Quels paramètres peuvent avoir une influence sur la résistance entre électrodes ?

Le choix des électrodes, l'effort de compression stabilisé et le temps d'accostage sont les éléments sur lesquels on intervient couramment.

#### • Action sur les électrodes

La figure 7.3 montre que sur un même assemblage les résistances de contact sont différentes pour des électrodes tronconiques et pour des électrodes bombées sphériques. Un choix judicieux de la forme, des dimensions et de la nature s'impose.

#### • Action sur l'effort de compression

L'élévation de cet effort faisant diminuer les résistances de contact, il est nécessaire d'augmenter l'intensité pour avoir un échauffement correct. L'effort est assuré par des vérins dont on règle la pression à l'aide de détendeurs.

#### • Action sur le temps d'accostage

On appelle temps d'accostage, exprimé en période, l'intervalle de temps qui sépare l'instant d'excitation de l'électrovanne permettant de mettre le vérin en pression (serrage) de l'instant où l'on commence à faire circuler un courant de soudage. Un réglage de temps trop long diminuerait la cadence mais un temps trop court peut occasionner des points percés ou des éclatements d'électrodes. Ce temps est réglé à l'aide de temporisateurs électroniques.

### 2° TEMPS DE SOUDAGE ET INTENSITÉ

#### • Temps de soudage

Ce temps mesure en périodes la durée de passage du courant. Il est réglable également à l'aide de temporisateur électronique. Pour un temps de réglage trop long, avec un courant permettant d'atteindre la fusion, les électrodes peuvent s'enfoncer dans les pièces et créer des points percés ou brûlés. Pour un temps trop court, la fusion n'étant pas réalisée, on obtient un point dit « collé ».

#### • Relation entre temps et intensité

La formule  $Q = 0,24.R.I^2.t$  peut s'écrire  $Q = 0,24.R.\frac{1}{2^2}.2.2.t$ . On pourrait penser qu'un courant d'intensité deux fois plus faible «  $\frac{1}{2}$  » appliqué pendant un temps quatre fois plus long (4.t) per-

mettrait d'obtenir une soudure de qualité équivalente. En fait, le rendement de l'opération est d'autant plus mauvais que le temps de soudage est long (pertes de chaleur).

En pratique, des diagrammes de soudabilité, dont la figure 7.8 donne l'allure générale, montrent l'existence d'un courant minimal  $I_{\text{mini}}$  en dessous duquel la soudure ne sera jamais exécutée et l'existence d'un temps minimal  $t_{\text{mini}}$  nécessitant une intensité trop importante pour obtenir une soudure correcte.

#### • Intensité de soudage

Le courant de soudage est fourni par un transformateur abaisseur de tension. Considérons un régime sinusoïdal pleine onde et examinons le schéma équivalent simplifié ramené au secondaire, tracé sur la figure 7.9

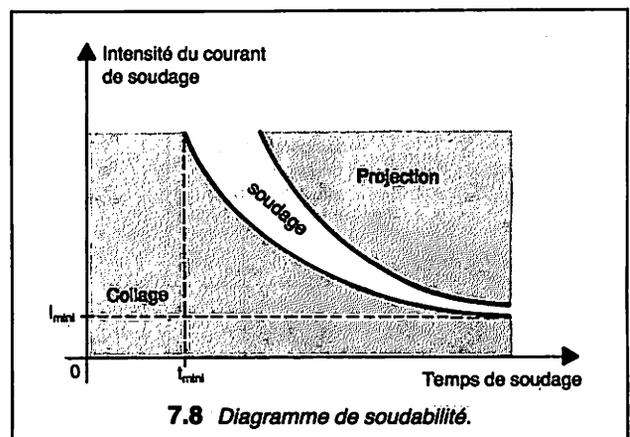
$$I_2 = \frac{U_2}{Z_{\text{ext}}} = \frac{U_2}{\sqrt{R_{\text{ext}}^2 + X_{\text{ext}}^2}}$$

$$\text{et } I_2 = \frac{U_{20}}{Z_{\text{total}}} = \frac{U_{20}}{\sqrt{(R_{\text{es}} + R_{\text{ext}})^2 + (X_{\text{es}} + X_{\text{ext}})^2}}$$

Quels sont les effets des variations de  $U_{20}$ ,  $R_{\text{ext}}$  et  $X_{\text{ext}}$  ?

– **Variation de  $U_{20}$**  : la tension secondaire à vide peut varier en agissant sur le rapport  $k = \frac{n_2}{n_1}$ . Si  $U_{20}$  augmente, pour une même

$Z_{\text{ext}}$ , le courant  $I_2$  augmente. Plusieurs plots situés sur l'enroulement primaire permettent de faire varier  $n_1$ , mais l'évolution du courant correspondante au passage d'un plot à l'autre est trop importante et irrégulière. Pour obtenir des variations plus souples, les installations de soudage sont équipées de systèmes de commutation et de commande électronique.



- **Variation de  $R_{ext}$**  : la résistance extérieure est la somme des résistances de contact, des résistances des pièces à souder et des résistances des éléments conducteurs.  $(R = \rho \times \frac{l}{S})$ . Une

augmentation de la longueur ou une diminution de la section des liaisons électriques au secondaire provoque une augmentation de  $R_{ext}$ , c'est-à-dire une diminution de  $I_2$ .

- **Variation de  $X_{ext}$**  :

$$X_{ext} = \frac{L_{ext}}{H} \cdot \omega \quad \text{avec} \quad \omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

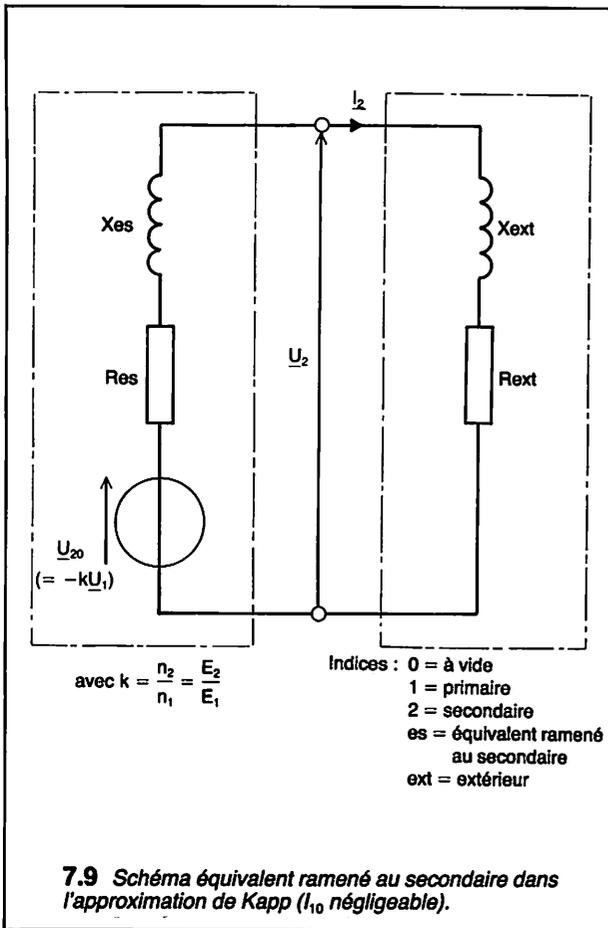
$\Omega$                   H                  rd/s                  Hz

Une augmentation de l'inductance  $L_{ext}$  entraîne une augmentation de la réactance  $X_{ext}$  provoquant une diminution du courant secondaire  $I_2$

L'influence de  $L_{ext}$  n'est pas négligeable et sa valeur s'élève rapidement quand la surface formée par les conducteurs extérieurs (boucle) s'agrandit et quand une masse métallique est placée entre les conducteurs.

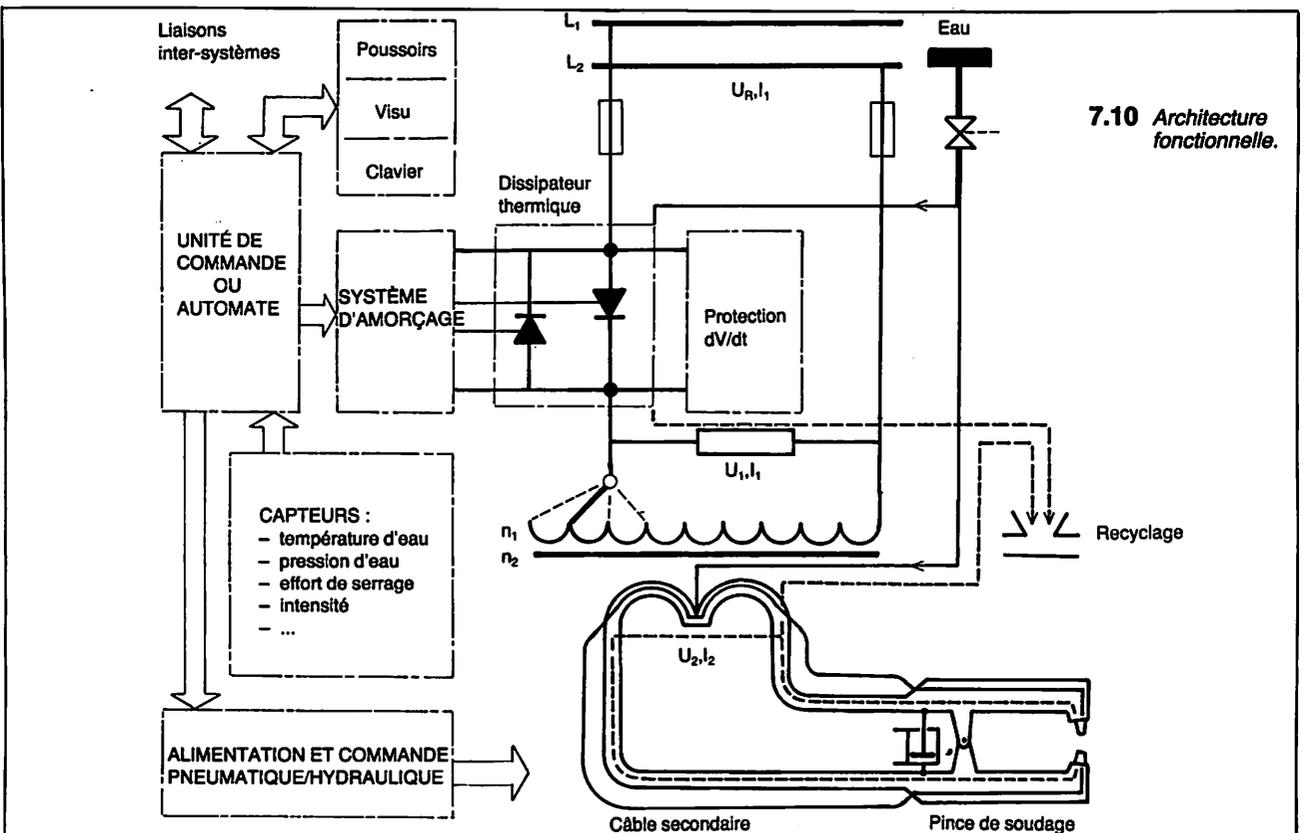
### 3° SYNTHÈSE DES MOYENS D'ACTION SUR LA QUANTITÉ DE CHALEUR PRODUITE

Grandeur	Action	Moyen
R	électrode	forme, nature
	effort de compression	détendeur, vérin
	temps d'accostage	temporisateur
t	temps de soudage	temporisateur
I	$n_2/n_1$	plot de transformateur
	I efficace	Commutation électronique
	$Z_{ext}$	Circuit extérieur



## 6. ARCHITECTURE FONCTIONNELLE D'UN SYSTÈME DE SOUDAGE PAR POINTS A ALIMENTATION MONOPHASÉE

Le schéma de la figure 7.10 montre les différentes fonctions ainsi que les liaisons.



## 7. ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS DU CIRCUIT ÉLECTRIQUE

### 1° ÉLECTRODES

Les électrodes sont les éléments consommables de la machine. Elles doivent :

- assurer une bonne conductibilité électrique. Le cuivre est donc le matériau de base.
- présenter une résistance satisfaisante à l'effort de compression. L'adjonction d'un autre matériau tel que le chrome (0,4 à 1,1 %) augmente la dureté mais diminue la conductibilité électrique.
- offrir une bonne conductibilité thermique. Les électrodes sont généralement munies d'un tube injecteur assurant le refroidissement à eau.
- interdire l'alliage avec les pièces à souder.
- être économiques. L'électrode monobloc étant coûteuse, on trouve des électrodes à embouts amovibles.

Les électrodes se présentent sous différentes formes et dimensions : tronconique, plate, bombée, sphérique ou droite, excentrée...

La figure 7.11 donne un exemple de montage.

Certains types d'électrodes appelées contre-électrodes présentent une surface de contact très importante et permettent d'effectuer des points de soudure sans marquage sur les tôles en contact avec elles.

### 2° LIAISON ÉLECTRIQUE DU CIRCUIT SECONDAIRE

La liaison électrique entre le transformateur et le porte-électrode doit laisser circuler un courant dont l'intensité peut atteindre quelques dizaines de kilo-ampères. Voir le tableau de la figure 7.12.

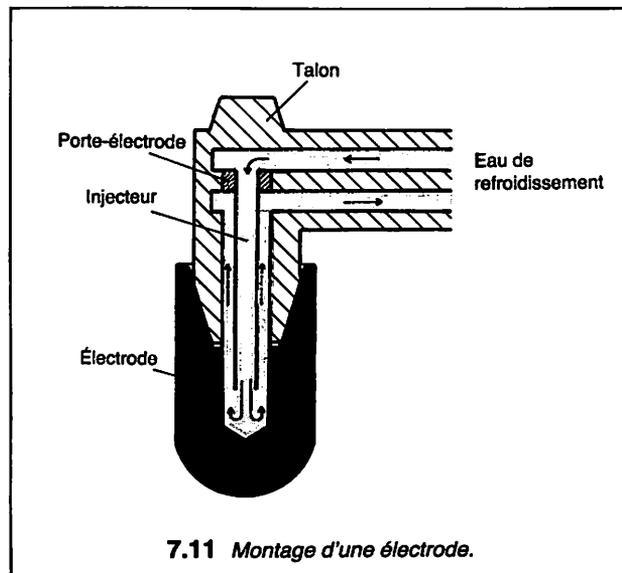
Elle est assurée par des tresses à refroidissement ambiant ou par des câbles unipolaires ou bipolaires (basse impédance) refroidis à l'eau. Ces derniers présentent une faible surface de boucle dont un exemple est donné sur la figure 7.13.

L'effort électrodynamique sur les câbles aller-retour est important au moment du soudage. La gaine s'oppose à l'écartement.

### 3° TRANSFORMATEUR

Les transformateurs du type abaisseur fournissent des intensités élevées au secondaire. Les échauffements importants pendant le soudage imposent un refroidissement à circulation d'eau dont le débit et la pression d'entrée sont imposés par le constructeur. Afin de faire varier la tension secondaire à vide, les transformateurs sont équipés d'un commutateur ou d'un sélecteur à barrettes.

Le tableau de la figure 7.14 montre quelques caractéristiques techniques de transformateurs de soudage C.N.O.M.O. (Comité de Normalisation des Outillages et Machines-Outils) et fait apparaître de nouvelles grandeurs qu'il faut définir.



### • Facteur de marche X %

Le transformateur ayant une utilisation intermittente, il est nécessaire de définir un coefficient, appelé facteur de marche, qui indique le temps d'utilisation exprimé en %.

$$X \% = \frac{\text{temps chaud}}{\text{durée d'un cycle}} \times 100 = \frac{t}{T} \times 100$$

Voir la fig. 7.7.

Exemple : Soit, à effectuer en une heure 90 séries de 20 points de soudure ayant chacun une durée de soudage  $t$  égale à 10 périodes.

$$\text{Durée d'un point} = \frac{3\,600\text{ s}}{90 \times 20} = 2\text{ s soit } T = 2 \times 50 = 100\text{ périodes}$$

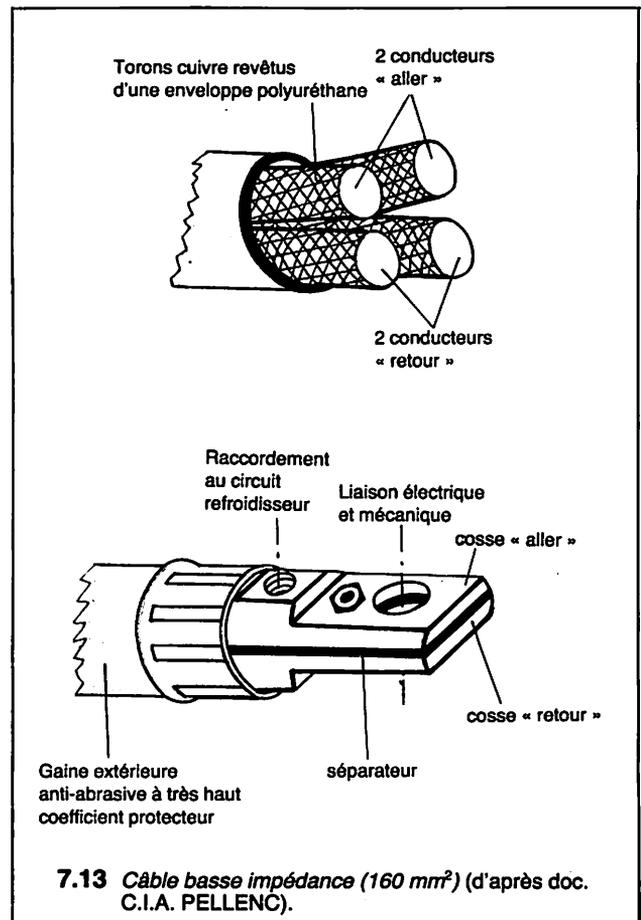
$$\text{d'où } X \% = \frac{t}{T} \cdot 100 = \frac{10}{100} \cdot 100 = 10\%$$

### • Relation entre intensité permanente $I_p$ et intensité réelle $I$

Afin de vérifier si le transformateur ne fonctionne pas à la limite de son échauffement et pour déterminer la section des câbles d'alimentation, on calcule l'intensité permanente équivalente. Cette dernière est définie comme l'intensité d'un courant qui circulerait

Épaisseur de la pièce la plus mince (mm)	0,4	1	4	8	12
Ø d'extrémité des électrodes (mm)	4,5	6	13	19	23
Intensités secondaires pour soudure en classe A (kA)	7,3	8,8	18	31,8	50,5
Effort de soudage (daN)	130	230	880	3 500	6 700

### 7.12 Valeur d'intensité de soudage.



Type	Tension primaire		Nombre de Réglages	Tension secondaire à vide $U_{20}$ (V)	Courant permanent $I_{20}$ (A)	Puissance apparente (kVA)		Débit circulation d'eau (l/min)	Poids (kg)
	$U_1$	(V)				nominate $S_n$	conventionnelle $S_{conv}$ (50 %)		
A	380	500	4	3 - 3,6 - 4,2 - 5	5.600	28	40	4	76
B	380	500	4	5 - 5,6 - 6,3 - 7	6.400	45	63	4	94
C	380	500	4	7 - 8 - 9 - 10	7.100	70	100	4	124
D	380	500	4	0,5 - 10,75 - 12 - 13,25	9.500	127	180	4	230

### 7.14 Transformateurs de soudage CNOMO.

en permanence ( $X = 100\%$ ) et provoquerait un échauffement identique au fonctionnement réel.

$$Q = 0,24 \cdot R \cdot I^2 \cdot t = 0,24 \cdot R I_p^2 \cdot T$$

$$I_p^2 \cdot T = I^2 \cdot t$$

$$I_p = I \cdot \sqrt{\frac{t}{T}} = I \cdot \sqrt{\frac{X\%}{100}}$$

#### • Relation entre puissance apparente nominale et conventionnelle

$S_n = U_{1np} \cdot I_{1np}$  où  $I_{1np}$  = courant primaire nominal permanent  
La puissance apparente conventionnelle  $S_{conv}$  correspond à un fonctionnement intermittent périodique pour un facteur de marche égal à 50 %.

#### • Vérification du choix d'un transformateur

Soit à réaliser le problème exposé dans le paragraphe « facteur de marche » avec un poste de soudage déjà équipé d'un transformateur type B. (fig. 7.14).

Le courant réel mesuré au primaire est  $I = 120$  A.

$$I_{1p} \text{ équivalent} = 120 \cdot \sqrt{\frac{10}{100}} = 38 \text{ A}$$

$$\text{or } I_{1np} \text{ du transformateur} = \frac{S_n}{U_{1n}} = \frac{45\,000}{380} = 118 \text{ A.}$$

Le transformateur satisfait largement aux conditions d'utilisation.

### 4° COMMUTATEUR ÉLECTRONIQUE

Le circuit de commutation proposé est schématisé sur la figure 7.10.

#### • Principe

En régime dit « pleine onde », un courant d'intensité efficace  $I_1$  en retard de  $\varphi$  par rapport à la tension d'alimentation  $V_R$  circule dans le primaire. En pratique :  $0,3 < \cos \varphi < 0,8$ .

En décalant l'instant d'amorçage des thyristors par rapport à une référence (le passage à zéro de la tension  $V_R$  ou l'instant d'extinction des thyristors) on obtient un courant « commuté » d'une intensité efficace différente et inférieure à  $I_1$  pleine onde.

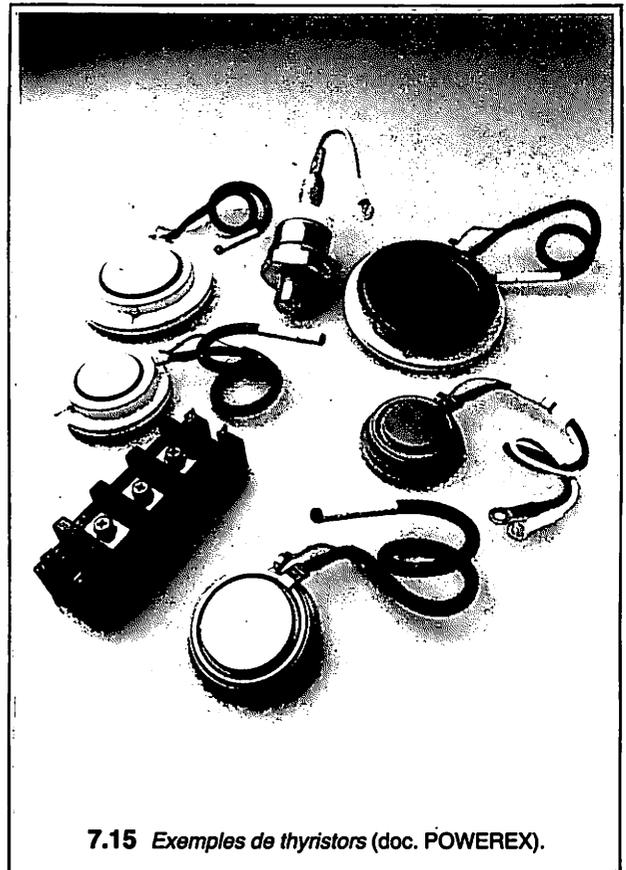
#### • Moyens

La commutation est assurée par deux thyristors montés tête-bêche en réseau monophasé (voir fig. 7.15).

L'importante puissance à dissiper par les thyristors doit être évacuée vers l'extérieur par un refroidissement à eau. On définit les performances des refroidisseurs par leur résistance thermique, c'est-à-dire l'échauffement du refroidisseur par rapport au milieu ambiant pour 1 watt dissipé par le semi-conducteur ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ).

- limite de la ventilation naturelle :  $0,15 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$
- ventilation forcée :  $0,05 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$
- refroidissement à eau :  $0,001 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$

La photo de la figure 7.16 montre un montage de refroidisseurs à eau réalisés en cuivre pour des thyristors tête-bêche de 200 à 4 000 ampères efficaces permanents.



7.15 Exemples de thyristors (doc. POWEREX).



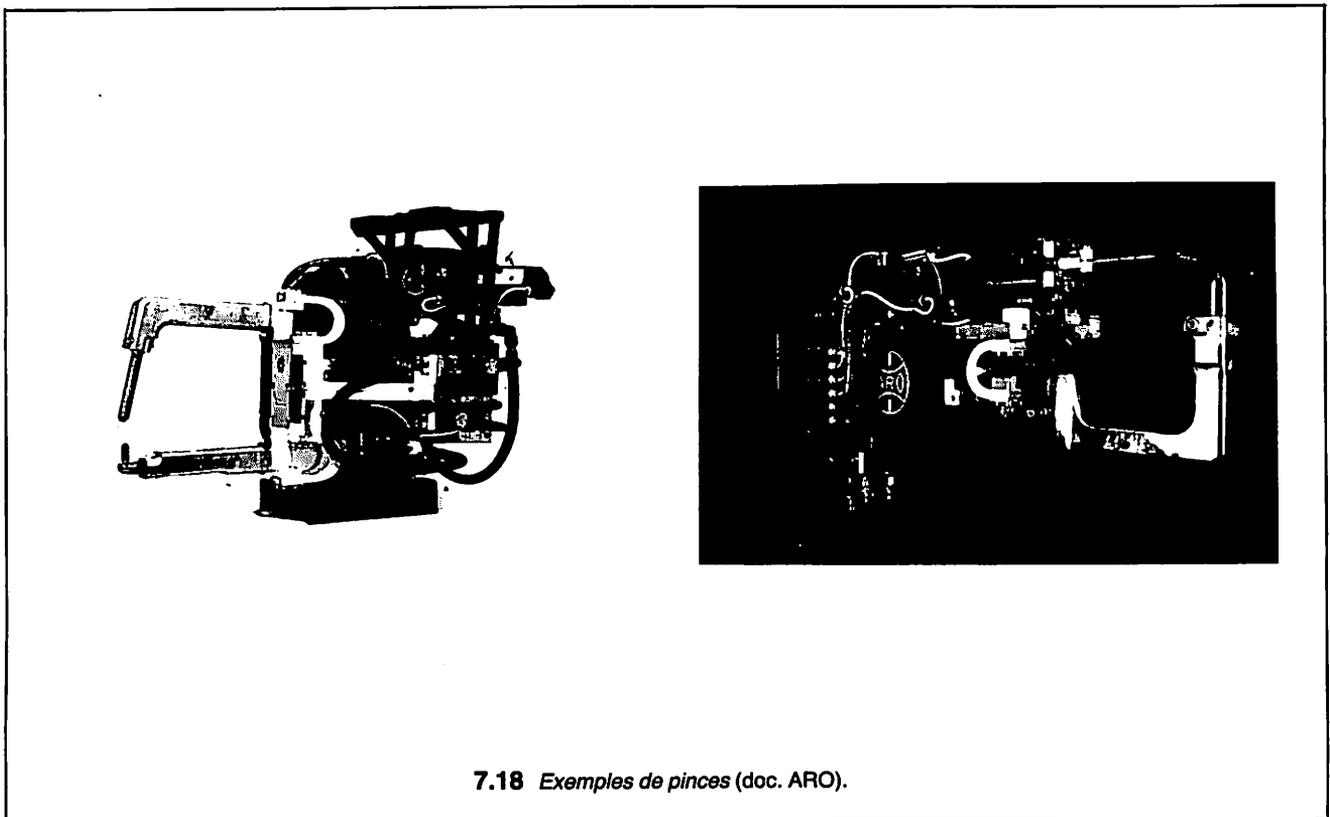
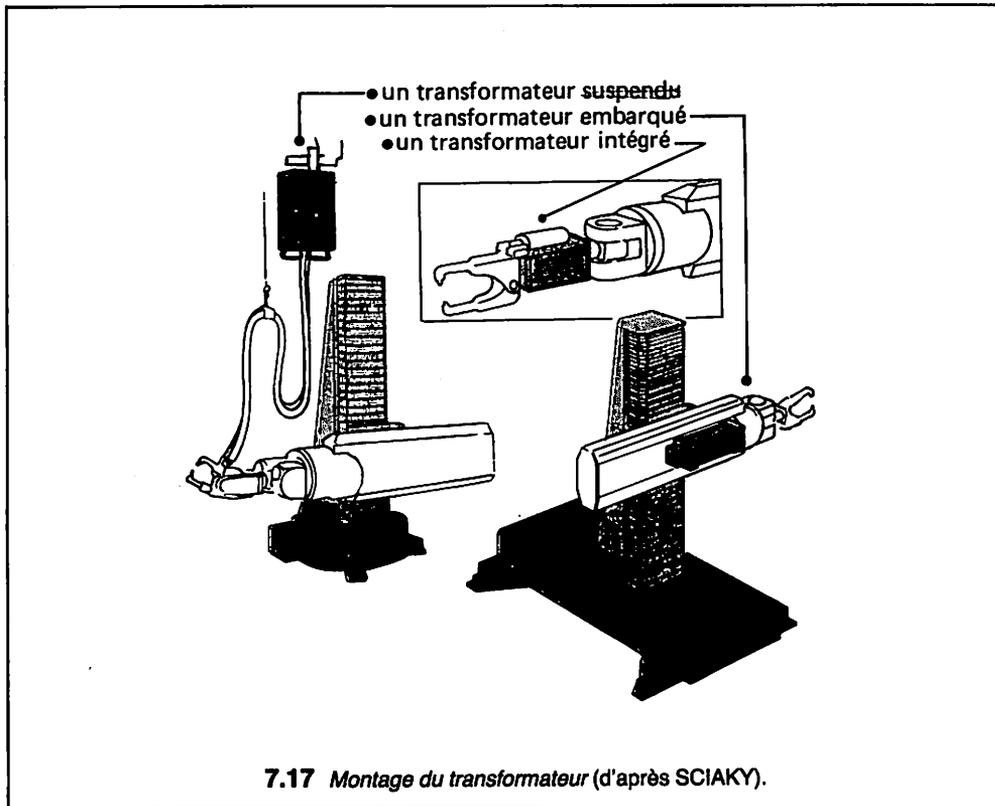
7.16 Exemple de montage de refroidisseur à eau (doc. ARCEL).

## 5° PINCES A SOUDER

Il est à noter, comme le montre la figure 7.17 que les transformateurs peuvent être « intégrés » aux pinces à souder. Cette solution permettant d'éviter, sur les robots, le remplacement fréquent et coûteux des câbles secondaires.

On distingue deux familles de pinces schématisées sur la figure 7.18 : les pinces ciseaux qui utilisent le principe du levier et les pinces en C dans lesquelles le vérin exerce directement son effort sur l'électrode mobile.

Les pinces pour robot sont équipées de vérins hydrauliques à simple effet ou de vérins pneumatiques à double effet.



# 8. AUTRES MODES DE SOUDAGES PAR RÉSISTANCE

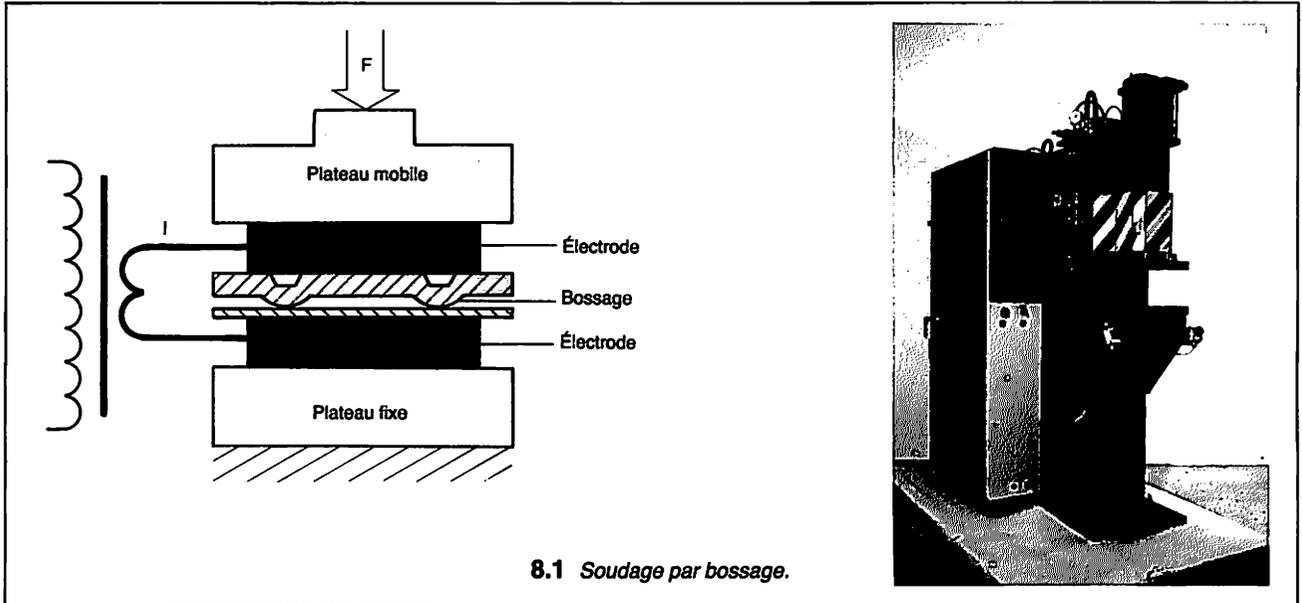
## 1. SOUDAGE PAR BOSSAGES

Ce procédé réalise un soudage par points entre deux pièces dont l'une comporte une ou plusieurs proéminences de métal appelées « bossages » (fig. 8.1). L'échauffement par effet Joule, conjugué à l'effort de pression, permet d'écraser les bossages en formant des points de soudure. Cette technique autorise l'exécution de plusieurs points par cycle, le soudage des éléments de fortes épaisseurs et la réalisation des soudures étanches dont un exemple est montré sur la figure 8.2.

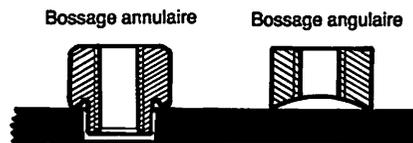
## 2. SOUDAGE A LA MOLETTE

Ce procédé de soudage exécute une succession de points au moyen de deux électrodes circulaires appelées « molettes ». La figure 8.3 en donne le schéma de principe.

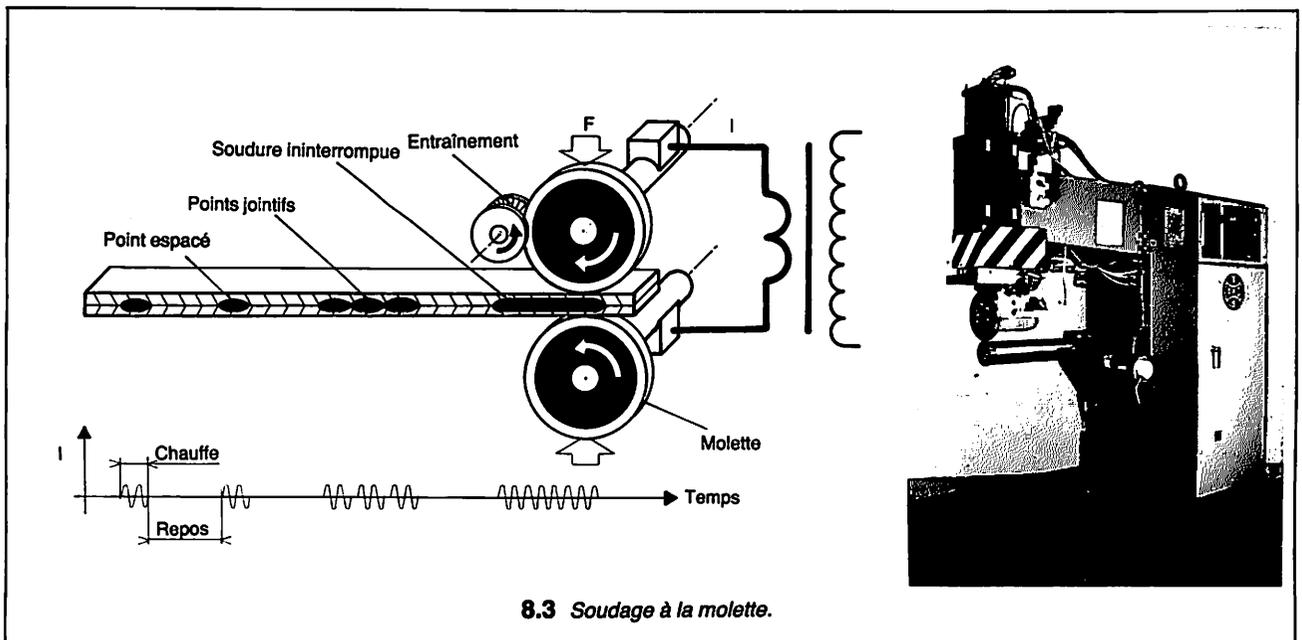
Le temps de passage du courant combiné à la vitesse de rotation des molettes détermine l'espacement des points de soudure. En réduisant le temps de repos on peut obtenir une succession de points jointifs ou superposés et réaliser ainsi une soudure étanche.



8.1 Soudage par bossage.



8.2 Écrous à bossage.



8.3 Soudage à la molette.

### 3. SOUDAGE EN BOUT

Dans ce mode de soudage, les pièces à souder sont serrées entre des mâchoires dont une paire est solidaire d'un chariot mobile en translation (fig. 8.4). Les méthodes d'échauffement permettent de distinguer deux types de soudage : par résistance et par étincelage.

#### • Soudage en bout par résistance

Ce procédé consiste à amener les pièces en contact sur toute leur surface de soudage puis à chauffer par effet Joule. Lorsque la température convenable du joint est atteinte, on applique un effort qui assure le soudage par forgeage. Le métal alors à l'état plastique forme un bourrelet au niveau du joint (fig. 8.5).

Cette technique nécessite un bon dressage et une parfaite propreté des pièces à souder. Elle ne peut pas être utilisée pour deux métaux de résistivité différente, le métal de résistivité la plus grande risquant de brûler avant que l'autre ait pu atteindre sa température de soudage.

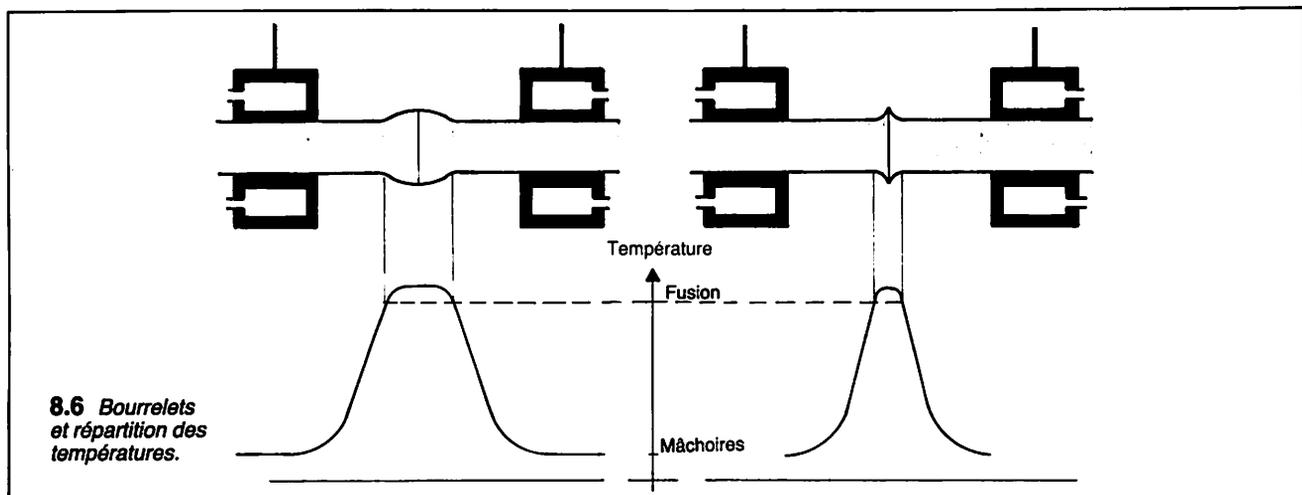
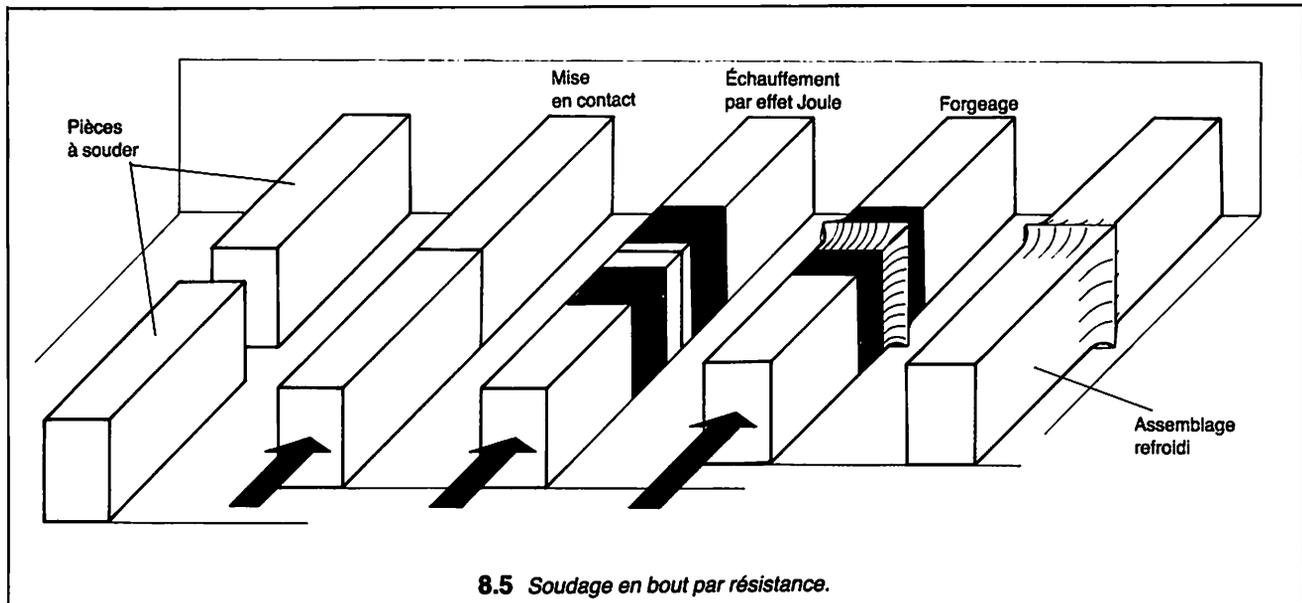
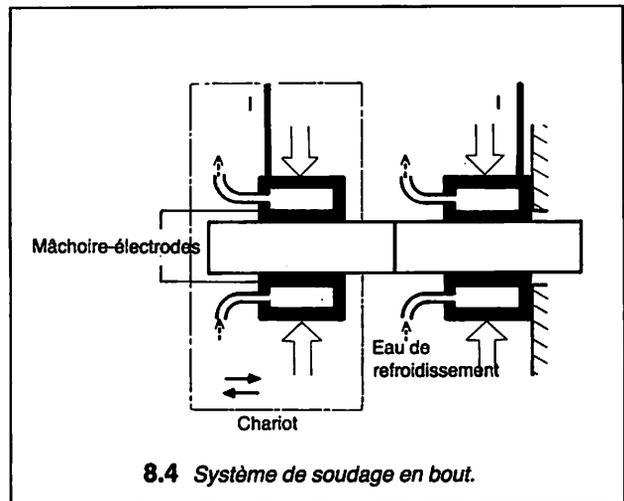
#### • Soudage en bout par étincelage

Cette méthode consiste à obtenir un contact imparfait au niveau du joint où la formation d'arcs chassera violemment le métal fondu vers l'extérieur. Ces arcs produisent des gaz neutres qui expulsent l'air et protègent le métal de toute nouvelle oxydation. Le métal est rendu plastique sur une faible épaisseur, ce qui permet de limiter l'importance du bourrelet. Le nettoyage des surfaces à souder est

moins important que pour la méthode précédente et on peut souder des pièces de résistivités différentes. L'inconvénient principal est la perte de la matière (fig. 8.6).

#### • Soudage mixte

Ce procédé alternant les phrases d'étincelage et de chauffage par résistance permet de souder les pièces de fortes sections et les métaux sensibles à la fissuration.



Deux techniques d'obtention de faisceau à énergie dirigée sont développées : le bombardement électronique et le laser.

## 9. SOUDAGE PAR BOMBARDEMENT ÉLECTRONIQUE

### 1. CARACTÉRISTIQUES DE SOUDAGE

Ce procédé effectue en une seule passe et sans métal d'apport, un soudage sous vide à partir de l'énergie fournie par un faisceau d'électron sur le plan de joint. Analogue aux techniques d'apport d'énergie superficielle utilisant une source concentrée comme le chalumeau ou l'arc électrique, il offre cependant une concentration d'énergie très supérieure. Cette dernière provoque un phénomène de pénétration profonde dans la matière et permet de réaliser des cordons de soudure très fins en ne provoquant que de faibles déformations et transformations métallurgiques.

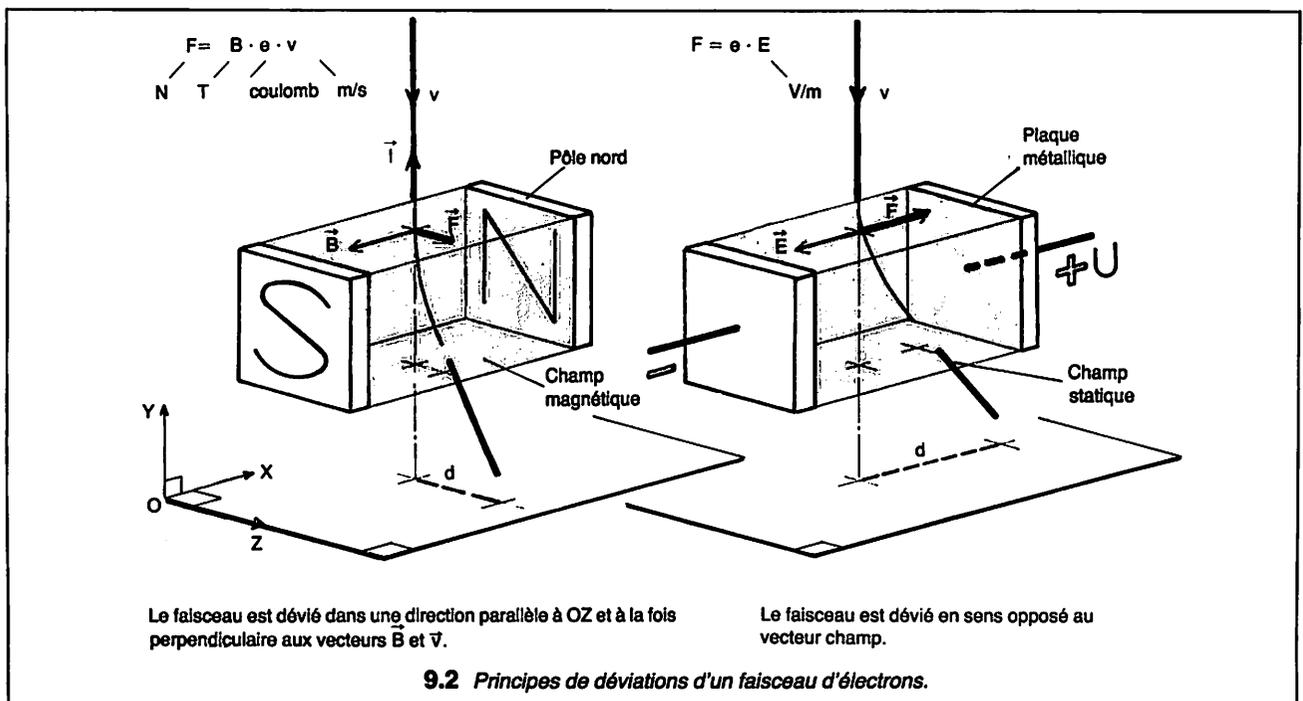
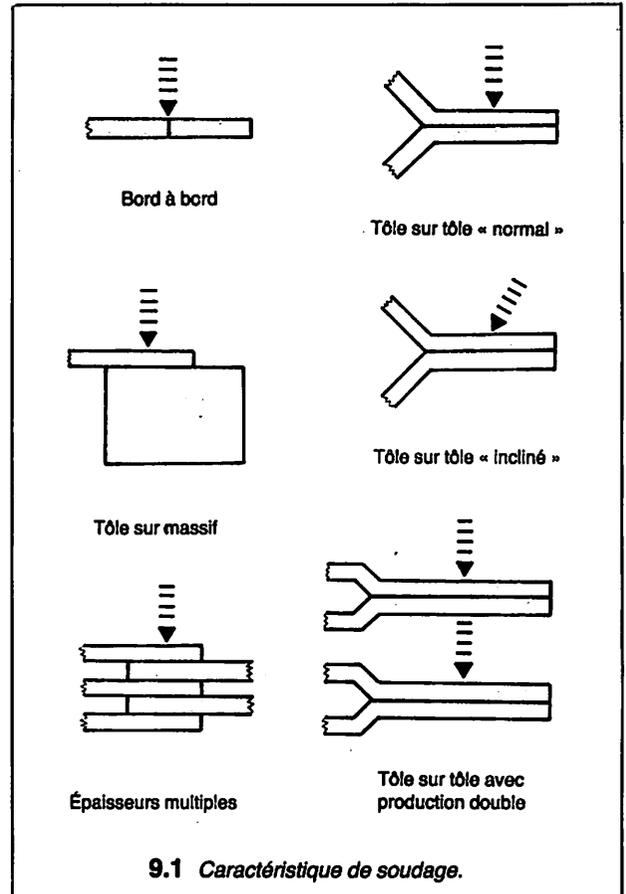
Il est à noter que le vide poussé permet de former une soudure saine.

Les dessins de la figure 9.1 illustrent quelques caractéristiques du procédé :

- le faisceau d'électrons suit l'angle d'attaque sans dévier et contrairement au soudage par résistance il n'est pas sensible aux variations des résistances électriques de l'assemblage mais il peut être perturbé par des champs magnétiques parasites.
- les soudures étroites de pièces bord à bord provoquent un faible retrait uniforme
- des soudures multiples ou de fortes épaisseurs peuvent être réalisées en une seule passe
- des assemblages dissymétriques sont possibles
- des métaux différents ou des métaux réfractaires sont soudables directement.

### 2. ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS

Une machine de soudage par faisceau d'électrons sous vide est principalement constituée par un canon à électrons et une chambre à vide de soudage.



### • Canon à électrons

Deux électrodes placées dans un vide poussé, alimentées sous une différence de potentiel très élevée, créent un puissant champ électrique. La cathode thermo-émissive chauffée à haute température émet des électrons qui sont projetés vers l'anode. Le wehnelt polarisé négativement par rapport à la cathode permet en agissant sur son potentiel de doser l'intensité du faisceau. Les électrons sont ensuite focalisés sur le joint à souder par une « lentille magnétique ». Un dispositif de déflexion en « X.Y. » sert à orienter le faisceau à l'intérieur de la chambre de soudage.

La figure 9.2 rappelle les principes de déviation d'un faisceau d'électrons et la figure 9.3 présente un exemple de canon à « triode » auquel il faudrait raccorder le pompage.

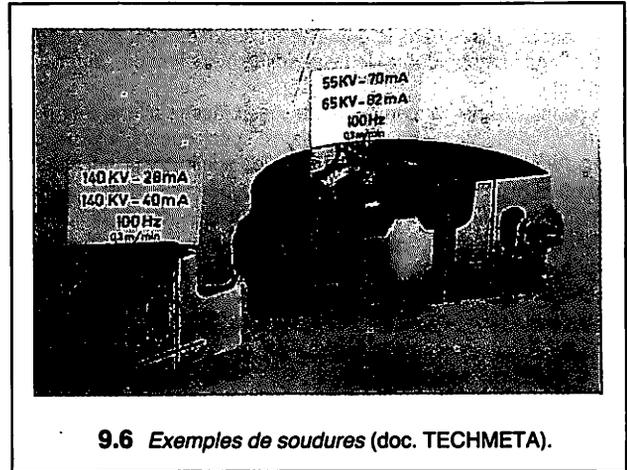
### • Chambre à vide de soudage

Les constructeurs proposent des modèles de chambre de dimensions standard ou adaptées aux problèmes posés. Un groupe de pompage assure le vide en un temps pouvant varier de quelques secondes à quelques minutes.

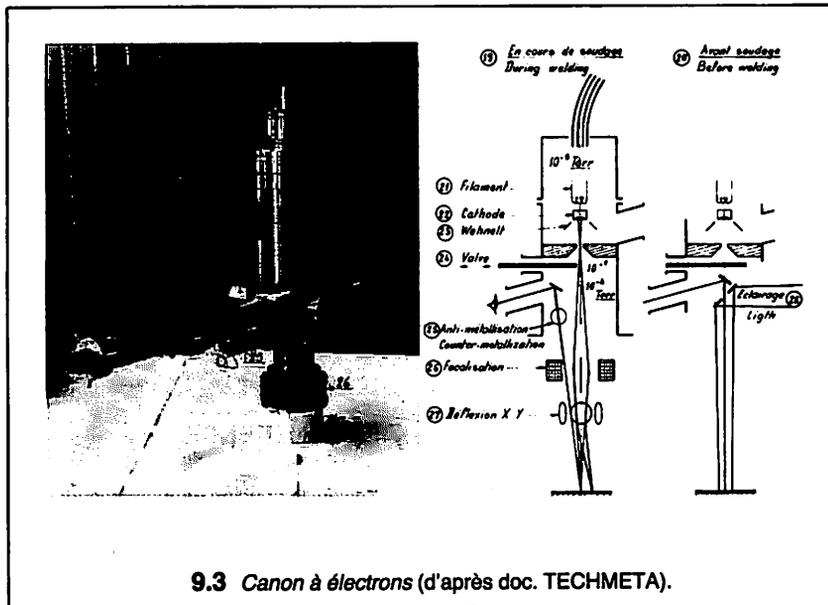
Des chambres à vide local, réalisées en deux parties, permettent d'enserrer localement l'assemblage à effectuer comme le montre l'exemple de rabotage de bandes de la figure 9.4. D'autres chambres autorisent le soudage en continu tel que celui sur chant de bandes bi ou tri-métalliques comme « invar-acier inoxydable » pour des bilames thermostatiques, ou « cuivre-acier » et « cuivre-argent » pour des contacts électriques (fig. 9.5).

### 3. PARAMÈTRES DE FONCTIONNEMENT

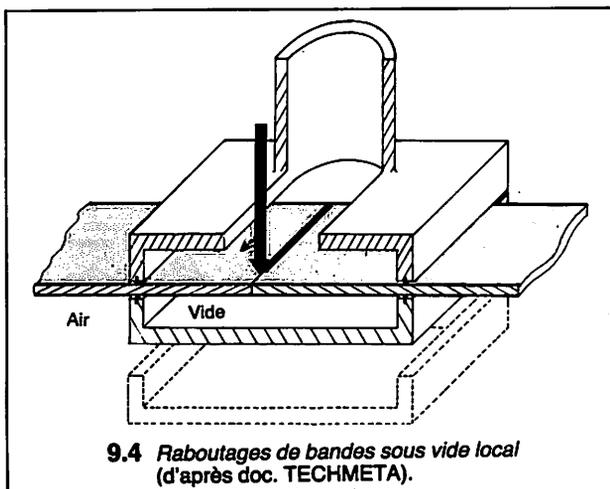
Pour un assemblage et une machine à souder donnés, quatre paramètres sont particulièrement importants : la puissance exprimée en kW, la pénétration en mm, la distance de tir en mm et la vitesse de soudage en m/min. Voir exemples de soudage fig. 9.6.



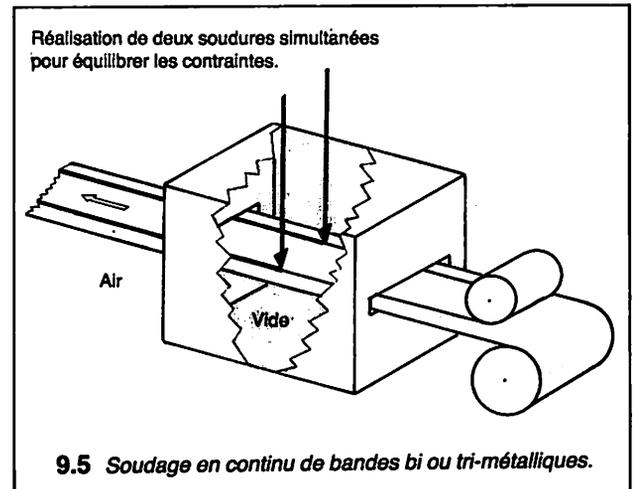
9.6 Exemples de soudures (doc. TECHMETA).



9.3 Canon à électrons (d'après doc. TECHMETA).



9.4 Rabotages de bandes sous vide local (d'après doc. TECHMETA).



9.5 Soudage en continu de bandes bi ou tri-métalliques.

# 10. SOUDAGE PAR FAISCEAU LASER

## 1. INTRODUCTION

Les lasers utilisés dans le domaine du soudage sont en général le laser à gaz carbonique et le laser solide YAG (yttrium, aluminium, Garnet).

La possibilité de concentrer un faisceau laser sur une très petite surface, produisant ainsi une puissance spécifique très élevée, offre des perspectives intéressantes pour les applications industrielles, notamment le soudage, la découpe, le perçage et le traitement thermique. Ces faisceaux peuvent être utilisés loin de leur source et dirigés au moyen de miroirs convenablement disposés. L'utilisation du faisceau laser présente d'autres avantages tels que les faibles zones affectées par la chaleur, de faibles déformations thermiques et l'absence de contact avec les pièces à traiter.

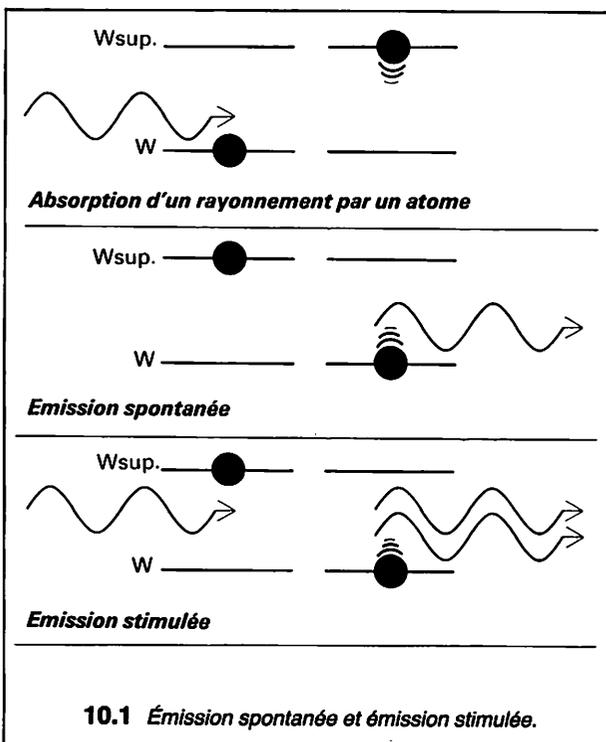
## 2. DÉFINITION

Le terme laser provenant de "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", signifie amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement. En fait, le laser est une source de rayonnement faisant appel à une technique d'émission dite stimulée.

## 3. COMPARAISON D'UNE ÉMISSION SPONTANÉE ET D'UNE ÉMISSION STIMULÉE

La figure 10.1 indique schématiquement ces deux types d'émissions.

Lorsqu'un atome est en état d'excitation, son retour vers un état moins excité peut, soit s'effectuer sans cause externe avec production d'une émission spontanée de rayonnement, ou être provoqué par un photon incident qui sans être absorbé produit l'émission d'un photon supplémentaire. On parle alors d'émission stimulée car ce mécanisme nécessite une cause externe. Dans ce deuxième cas, le photon produit a même fréquence, même direction et même sens que celui qui lui a donné naissance.



La fréquence a pour expression  $f = \frac{\Delta W}{h}$  dans laquelle  $\Delta W$  est l'énergie emmagasinée et  $h$  est la constante de Planck, égale à  $6,6 \cdot 10^{-34}$  J/s. La longueur d'onde de la radiation vaut alors :

$$\lambda = \frac{c}{f} = c \cdot T \quad \text{avec} \quad c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$\lambda$  (m)       $c$  (m/s)       $f$  (Hz)

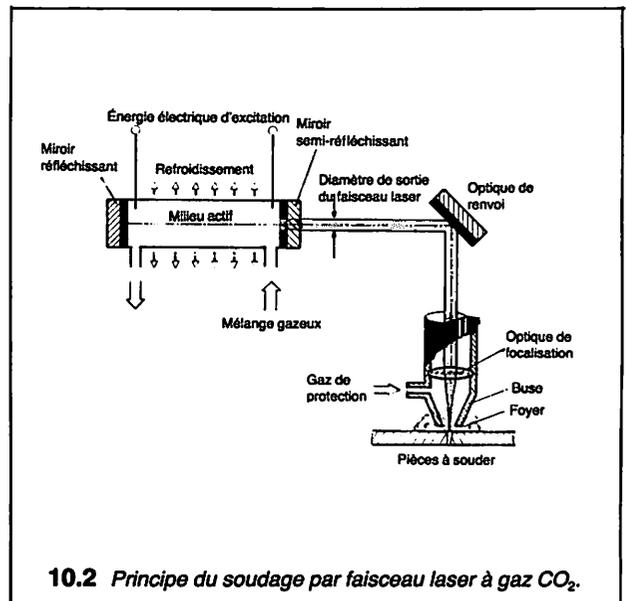
## 4. PRINCIPE DE PRODUCTION D'UN FAISCEAU LASER DANS UN MILIEU ACTIF GAZEUX

Le schéma de principe de la figure 10.2 montre que le faisceau est généré dans un milieu actif constitué d'un mélange gazeux ( $\text{CO}_2$ , He,  $\text{N}_2$ ) aux proportions parfaitement déterminées et enfermé dans une cavité. Par l'intermédiaire d'électrodes internes, une source électrique continue, alternative ou impulsionnelle, produit une décharge (sans atteindre le régime d'arc) dans le milieu gazeux qui est ainsi excité à un niveau compatible avec l'émission laser. Des photons spontanément émis dans toutes les directions vont rencontrer des atomes excités et déclencher par émissions stimulées de nouveaux photons qui à leur tour provoquent d'autres émissions, de telle sorte que le processus s'amplifie de proche en proche. Seuls les photons se déplaçant parallèlement à l'axe de la cavité sont actifs ; les autres créant une énergie inexploitable qui doit être dissipée par un circuit de refroidissement. Comme l'amplification du signal et le nombre de photons produits augmentent avec la longueur du parcours dans le milieu actif, on a réalisé un résonateur au moyen de deux miroirs entre lesquels le rayonnement effectue de nombreux allers et retours. Un des miroirs d'extrémité est parfaitement réfléchissant (Cu + Au) alors que l'autre est un élément semi-réfléchissant traité (Ge, AsGa, ZnSr) qui permet au faisceau de sortir.

Pour utiliser ce faisceau laser en soudage, des optiques de transmission et de focalisation sont nécessaires. Il faut d'autre part protéger le bain de fusion contre l'oxydation par un jet de gaz neutre (Ar,  $\text{N}_2$ , He).

## 5. COHÉRENCE

Suivant le principe énoncé précédemment, les photons émis ont la même longueur d'onde (monochromaticité) et sont en phase ; on dit alors que le faisceau est cohérent.



## 6. POMPAGE

Dans l'exemple de faisceau laser présenté, l'énergie d'excitation est effectuée par une décharge électrique. Cette opération est appelée « pompage » par analogie au pompage hydraulique qui augmente l'énergie d'une masse d'eau en l'élevant à un niveau supérieur. Il existe de nombreux procédés, notamment le pompage optique (flash, autre laser), le pompage électronique (faisceau d'électrons, décharge électrique), le pompage thermique, etc.

## 7. MILIEU ACTIF

Un classement des lasers suivant la nature du milieu actif fait apparaître quatre grandes familles signalées dans le tableau repéré 10.3 : les lasers à gaz, les lasers liquides à colorants, les lasers solides isolants et la famille des lasers à semi-conducteurs représentée par les diodes lasers.

## 8. CARACTÉRISTIQUES DU FAISCEAU LASER

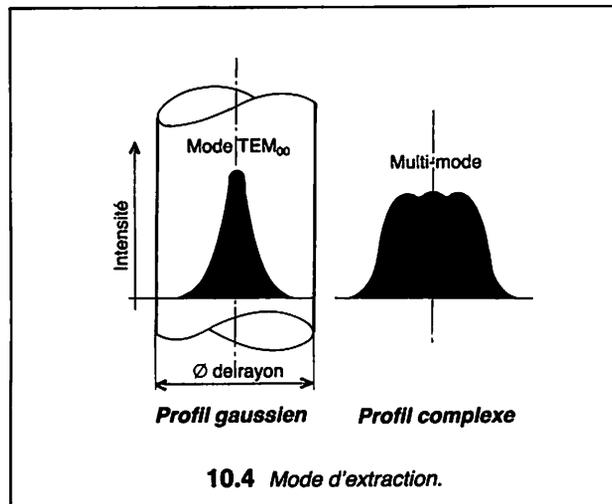
### • Longueur d'onde.

Le tableau 10.3 montre que la longueur d'onde dépend de la nature du milieu actif.

laser CO<sub>2</sub> :  $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$  ; laser YAG :  $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$ .

Type	Long. d'onde	Type	Long. d'onde	
CO <sub>2</sub>	10,6 $\mu\text{m}$	Colorants		LIQUIDE
Chimique (HF, DF)	2,6 - 4 $\mu\text{m}$	continu	400 - 1 000 nm	
		pulsé	320 - 970 nm	
Excimère (ArF, KrF)	193,248 nm	Alexandrite	700 - 815 nm	SOLIDE (isolant)
XeCl, XeF	308,351 nm	Centre coloré	1,5 - 3,3 $\mu\text{m}$	
Infrarouge lointain	20 - 1 000 $\mu\text{m}$	Verre	1,06 $\mu\text{m}$	
Hélium néon	633 nm	YAG	1,06 $\mu\text{m}$	
Photo-iodure	1,315 $\mu\text{m}$	Rubis	694 nm	SOLIDE (semiconducteur)
		Ion (argon, krypton, xénon)	488,514 ; 647 ; 530 ; 351 nm	
Hélium cadmium	442,325 nm	In Ga As P	1,3 - 1,6 $\mu\text{m}$	
Vapeur de cuivre	510,578 nm	Sel de plomb	2,30 $\mu\text{m}$	
Vapeur d'or	628 nm			
Azote	337 nm			

10.3 Les principaux lasers.



### • Puissance et mode d'extraction.

La puissance transportée doit être associée au mode d'extraction du faisceau : le mode fondamental TEM<sub>00</sub> est très utilisé en soudage et découpe, tandis que les modes TEM<sub>01</sub>, TEM<sub>02</sub> et multi-modes sont intéressants en traitement thermique. La figure 10.4 représente deux de ces modes.

### • Divergence du faisceau et point de focalisation

La divergence du faisceau est extrêmement faible et le faisceau peut être focalisé en un foyer de faible volume permettant d'obtenir des températures très élevées (plusieurs milliers de degrés). L'analyse du faisceau au point focal va mettre en évidence le rayon minimal et la puissance spécifique maximale.

Pour un rayonnement laser donné, la plus grande partie de l'énergie est contenue dans un faisceau dont l'angle  $\theta$  de divergence est donné par :

$$\theta = 1,2 \cdot \frac{\lambda}{d}$$

— longueur d'onde d'émission  
— diamètre du faisceau à la sortie du laser

Après concentration du faisceau par une optique de focale  $f$ , la tâche lumineuse au foyer a un rayon  $r$  tel que :

$$r = f \cdot \theta \quad \text{soit} \quad r = f \cdot 1,2 \cdot \frac{\lambda}{d}$$

Le choix d'une ouverture optique  $F = 1$  (d'où  $f = d$ ) permet d'écrire :  $r = 1,2 \cdot \lambda$ .

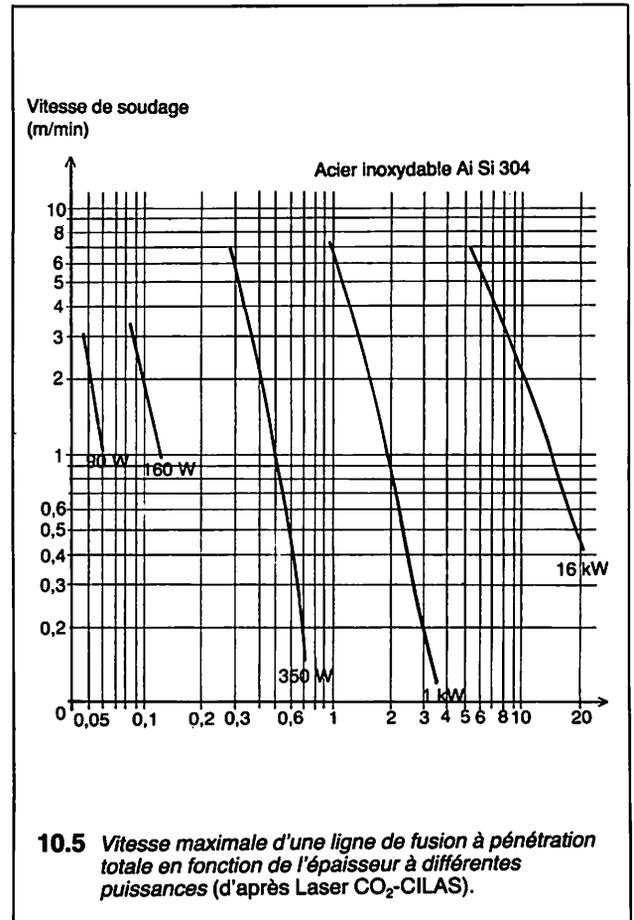
Pour un laser CO<sub>2</sub> le rayon minimum théorique est de :  $r = 1,2 \cdot 10,6 \approx 12,8 \mu\text{m}$ .

En pratique la focale employée est 5 à 20 fois le diamètre «  $d$  » d'émission et le rayon de la tâche focale est donc plus important. Au point de focalisation, un laser de puissance  $P$  permet d'atteindre une puissance spécifique donnée par :

$$P_{\text{spé}} = \frac{P}{\pi \cdot r^2}$$

— W  
— cm<sup>2</sup>

Pour un laser CO<sub>2</sub> continu de 1 kW et pour  $r = 100 \mu\text{m}$  on obtient :  $P_{\text{spé}} \approx 3 \text{ MW/cm}^2$ .



## 9. MÉCANISME DE SOUDAGE LASER

La figure 10.5 montre que la pénétration dépend de la puissance du faisceau laser et de la vitesse de soudage.

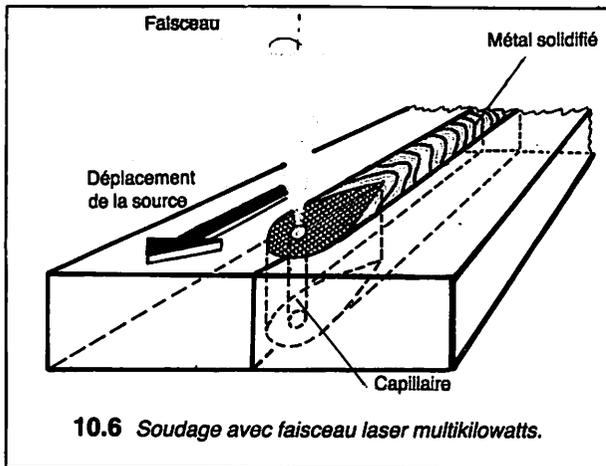
Pour les puissances inférieures à 1 500 W l'énergie est absorbée par la surface des pièces et la pénétration est limitée à la conduction thermique. Pour les puissances dissipées de plusieurs kilowatts, d'autres mécanismes physiques se développent. Le faisceau laser dépose alors son énergie tout le long d'un capillaire dont l'équilibre s'effectue sous l'effet de la pression des vapeurs métalliques et de la tension superficielle du métal liquide tapissant les parois. La figure 10.6 montre que lorsque le faisceau se déplace, le métal liquide qui tapissait le capillaire se solidifie. Quand le capillaire qui assemble les pièces à souder.

## 10. EXEMPLES D'APPLICATIONS INDUSTRIELLES DE SOUDAGE

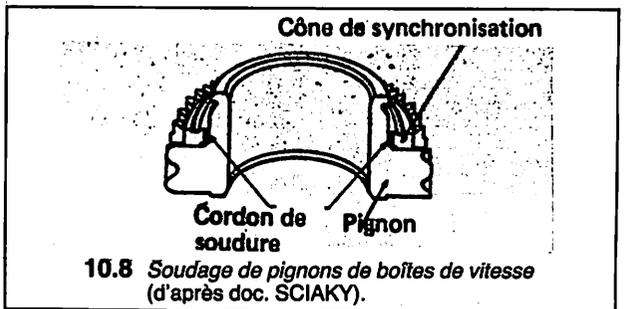
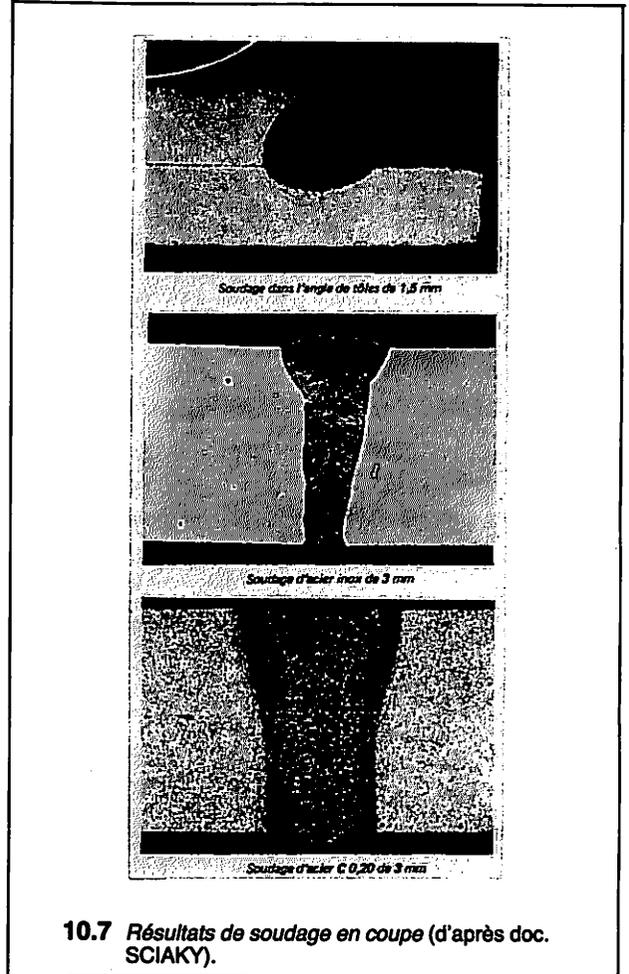
La figure 10.7 montre quelques résultats de soudage de tôles minces, d'acier inoxydable et de tôles embouties pour automobile. La figure 10.8 présente une application aux pignons de boîtes de vitesses.

## 11. COMPARAISON DU FAISCEAU LASER A D'AUTRES PROCÉDÉS DE SOUDAGE

Les lasers commerciaux couramment utilisés dans l'industrie ont des puissances de soudage que des procédés conventionnels sont capables de fournir, par contre la densité de puissance que l'on peut atteindre est très supérieure. L'exemple de comparaison de la figure 10.9 donne une idée générale des différentes possibilités. Nous pouvons remarquer que le rendement énergétique du faisceau laser est très faible par rapport à celui d'électrons.



Bien que l'inconvénient majeur du laser soit son coût élevé d'investissement, celui-ci peut être justifié lorsque la productivité est élevée et que l'on souhaite réduire les déformations des pièces.



PROCÉDÉ	FL		FE		PLASMA	TIG
Puissance transportée par la source (kW)	2,5	5	3	5	4	2
Puissance totale installée (kW)	35	60	4	6	6	3
Vitesse de soudage (mm/sec.)	12	33	20	33	10	3
Énergie par unité de longueur (J/mm)	200	150	150	150	400	660
Retrait (mm)	négligeable	négligeable	négligeable	négligeable	environ 1 mm	environ 1 mm
Distorsion angulaire	quasi parallèle	quasi parallèle	quasi parallèle	quasi parallèle	distorsion en V 2x5°	distorsion en V 2x7°
Sécurité et protection	Écran de protection contre la lumière réfléchie		Protection contre les rayons X		Protection contre la lumière du plasma	Protection contre la lumière de l'arc

**10.9 Comparaison des procédés en soudage de 4 mm d'acier faiblement allié (doc. SCIAKY).**

# 11. SOUDAGE A L'ARC

## 1. INTRODUCTION

L'arc électrique est un mode de chauffage qui trouve des applications en soudage et dans les fours industriels. Des caractéristiques de l'arc électrique ont déjà été traitées dans le thème 5 du tome 1 : chute de tension, colonne d'arc et extinction.

La chaleur nécessaire pour réaliser la soudure est dégagée par un arc électrique amorcé puis entretenu entre deux électrodes ou entre une électrode et une pièce à assembler. L'arc permet de fondre également un métal d'apport qui peut être fourni par l'électrode, lorsque celle-ci est fusible.

La nature de l'électrode ainsi que celle du milieu de protection de l'arc permettent de distinguer les différents procédés présentés dans ce thème.

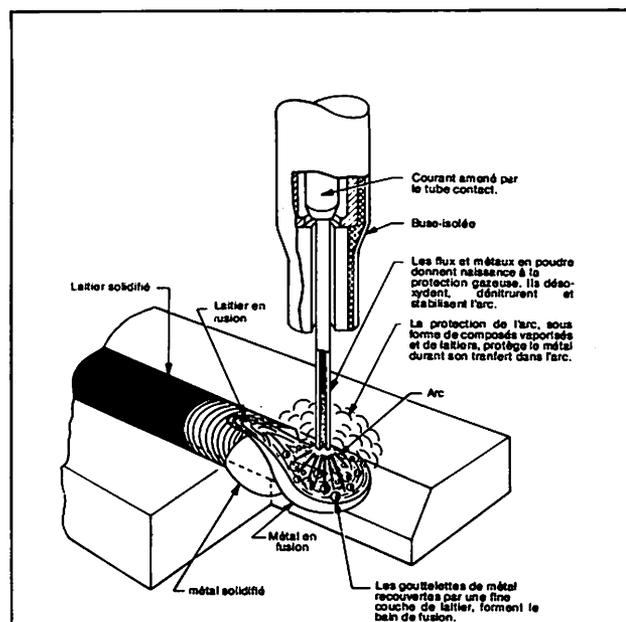
Nature de l'électrode	Milieu de protection	Procédé de soudage à arc
Métal d'apport fusible	Enrobage d'électrode	Avec électrode enrobée
	Intérieur de fil électrode tubulaire	A fil fourré (sans gaz)
	Gaz Inerte	M I G (métal Inerte Gas)
	Gaz Actif	M A G (métal Active Gas)
Tungstène réfractaire	Poudre	Sous flux en poudre
	Gaz Inerte	T I G (Tungsten Inert Gas) Au PLASMA

## 2. SOUDAGE A L'ARC AVEC ÉLECTRODE ENROBÉE ET A FIL FOURRÉ (sans gaz)

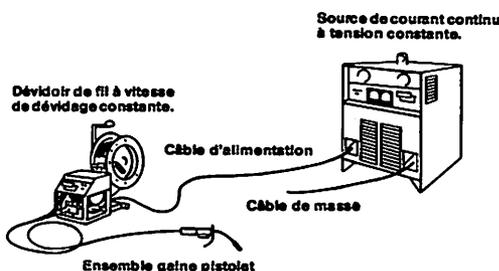
Voir la figure 11.1 montrant une électrode enrobée.

- L'âme fusible de l'électrode constitue le métal d'apport.
- L'enrobage isolant évite des arcs parasites avec l'environnement conducteur. Il favorise l'amorçage et la stabilisation (carbonates de Na et K) et assure la protection de la soudure. En effet, lorsqu'il est en fusion en même temps que l'âme, il produit un dégagement gazeux et un laitier qui protègent le métal depuis son transfert dans l'arc jusqu'à son refroidissement. Les différents types d'enrobages, les conditions opératoires et les caractéristiques mécaniques sont répertoriés selon une norme (NF A 81-309) qui précise aussi la nature du courant (continu ou alternatif) que l'on peut utiliser pour la fusion.

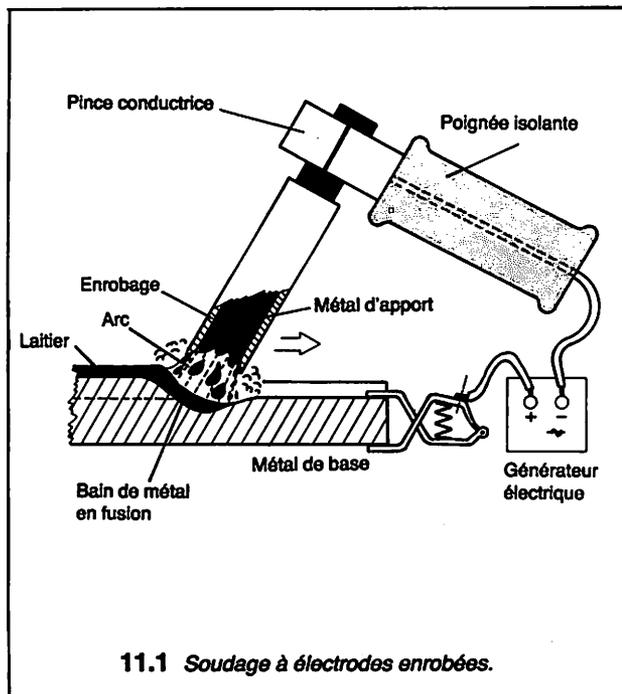
La figure 11.2 représente un procédé de soudage sans gaz semi-automatique à fil-électrode fourré avec électrode inversée, c'est-à-dire reliée au pôle +.



### EQUIPEMENT NECESSAIRE



11.2 Soudage semi-automatique à fils fourrés sans gaz avec électrode inversée continue (d'après doc. LINCOLN-ELECTRIC).



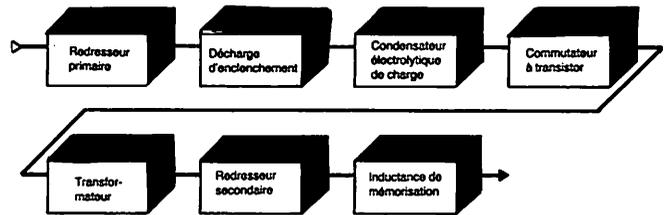
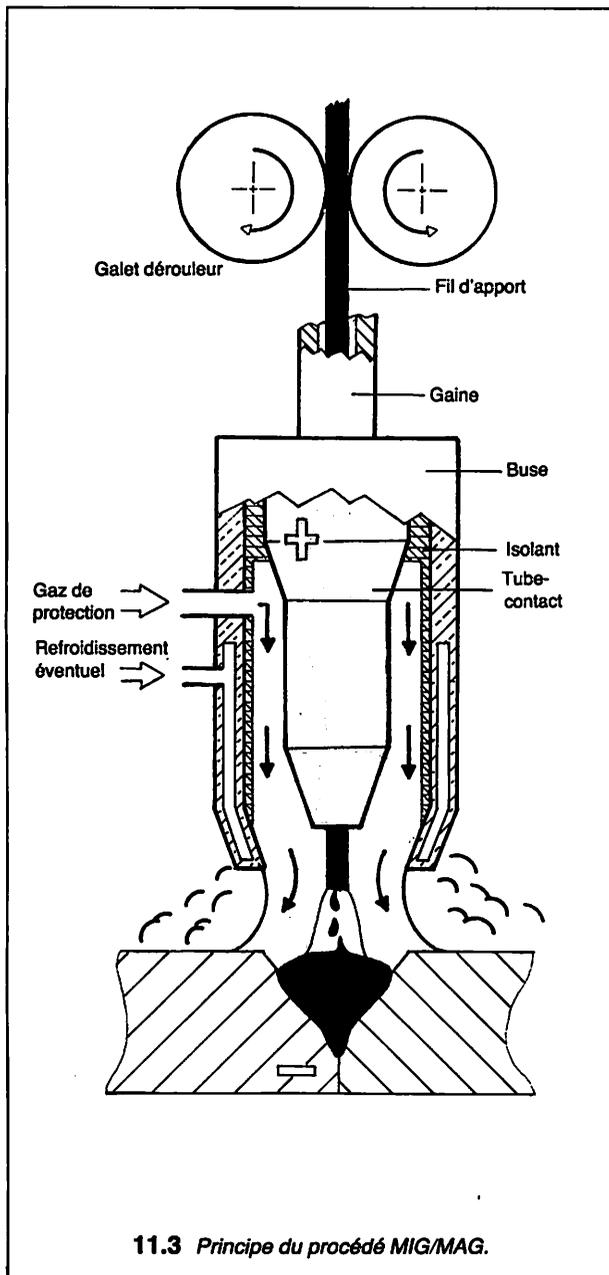
11.1 Soudage à électrodes enrobées.

### 3. SOUDAGE A L'ARC SOUS PROTECTION GAZEUSE INERTE OU ACTIVE AVEC ÉLECTRODE FUSIBLE : PROCÉDÉS MIG/MAG

Le schéma de principe de la figure 11.3 visualise une torche de soudage dans laquelle un tube-contact (Cu) relié à un pôle + du générateur continu, guide le fil fusible dont l'avance est assurée par deux galets d'entraînement. Le fil électrode débouche dans une buse qui dirige le gaz de protection vers le bain de fusion. La nature du gaz différencie les procédés : MIG avec un gaz inerte (argon Hélium) et MAG avec un gaz actif (CO<sub>2</sub> ou CO<sub>2</sub>-argon).

Les procédés MIG/MAG sont les plus appliqués. Leur usage avec une source à courant pulsé permet de maîtriser l'arc électrique. Le transfert de la goutte de métal sur les pièces est généré par des impulsions de courant continu. Le principe de montage d'une telle alimentation se trouve sur la figure 11.4.

Le nombre et la taille des gouttes pouvant être définis, un micro-processeur peut alors gérer leurs transferts en fonction d'éléments comme le chanfrein, la géométrie de la pièce et la vitesse d'exécution. L'automatisation d'un tel procédé fait donc appel à des programmes de soudage qui harmonisent les différents paramètres tels que la tension de soudage et la vitesse d'avance du fil-électrode. Un exemple de robot au travail est montré sur la figure 11.5.

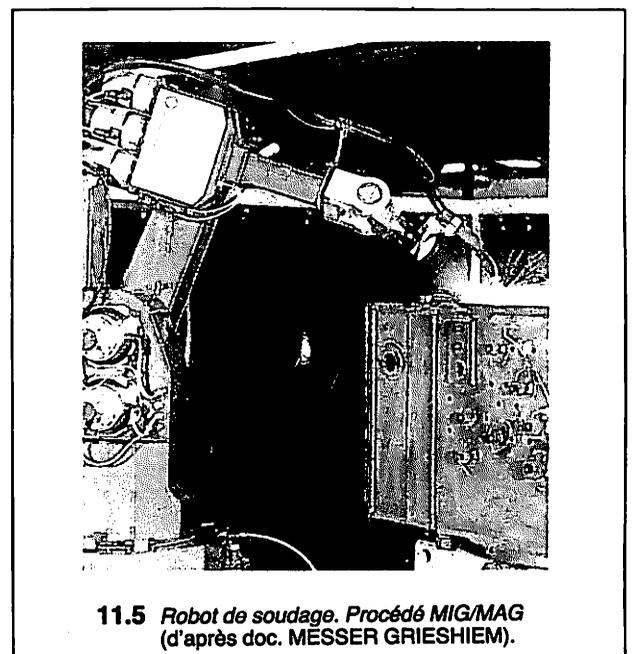


#### Caractéristiques

Courant de soudage	50 à 500 A (continu)
Durée d'enclenchement	
60 %	500 A
100 %	390 A
Tension de soudage	15 à 40 V
Tension à vide	50 V
Tension de réseau	3 × 380 V (compensation ± 10 %)
Fusible	35 A
Courant primaire permanent	29 A
Puissance absorbée	19 kVA
Puissance nominale	16 kW
Facteur de puissance	0,92
Rendement	0,88
Vitesse d'avance du fil	1 à 18 m/min
Tension de commande	42 V
Nature du refroidissement	F
Classe d'isolation	H
Degré de protection	IP 21

Le courant triphasé (réseau 380 V) de fréquence réseau 50 Hz est redressé par des diodes et lissé par des condensateurs électrolytiques. Des transistors haute puissance débitent la tension continue dans l'enroulement primaire du transformateur de soudage à une fréquence de 25 kHz (non audible). L'enroulement secondaire mène par des diodes de redressement aux raccords de soudage de l'installation. (d'après doc. MESSER GRIESHIM)

#### 11.4 Exemple d'alimentation transistorisée pour le soudage par impulsions MIG/MAG.



#### 4. SOUDAGE A L'ARC SOUS FLUX EN POUDRE

Le principe de ce procédé, dessiné sur la figure 11.6 consiste à entretenir un arc entre un fil-électrode nu et les pièces à souder, sous un flux en poudre de même nature qu'un enrobage d'électrode.

Pour cela, on déverse à l'avant du fil un flux dont l'excès est récupéré à l'arrière par aspiration. A l'amorçage l'arc jaillit dans la couche de flux traversée par le fil-électrode. La poudre fond localement (très fluide) et il se forme une cavité remplie de gaz. Le laitier produit tient alors le même rôle protecteur que pour les électrodes enrobées.

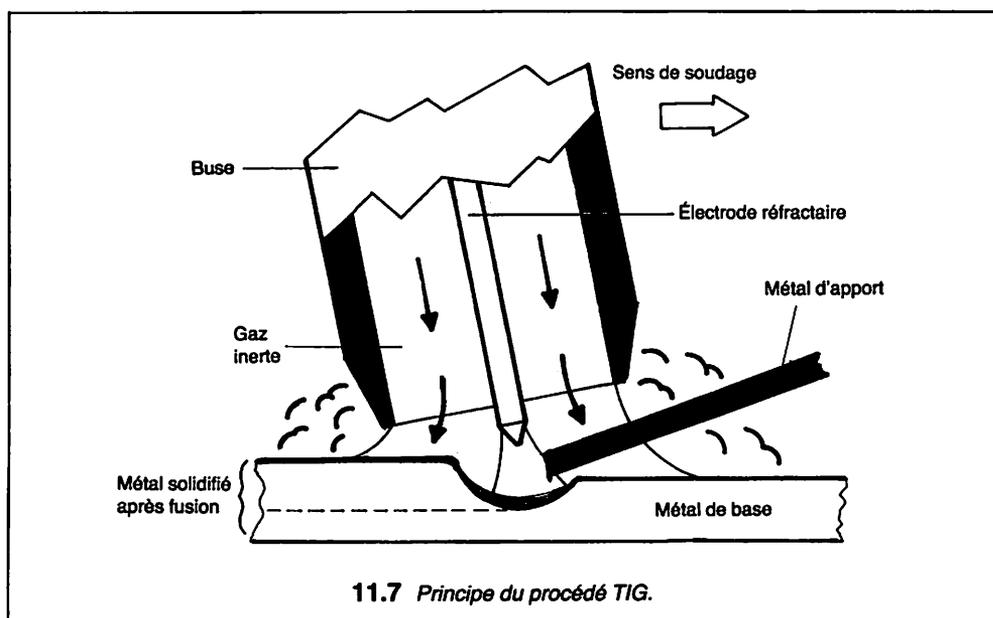
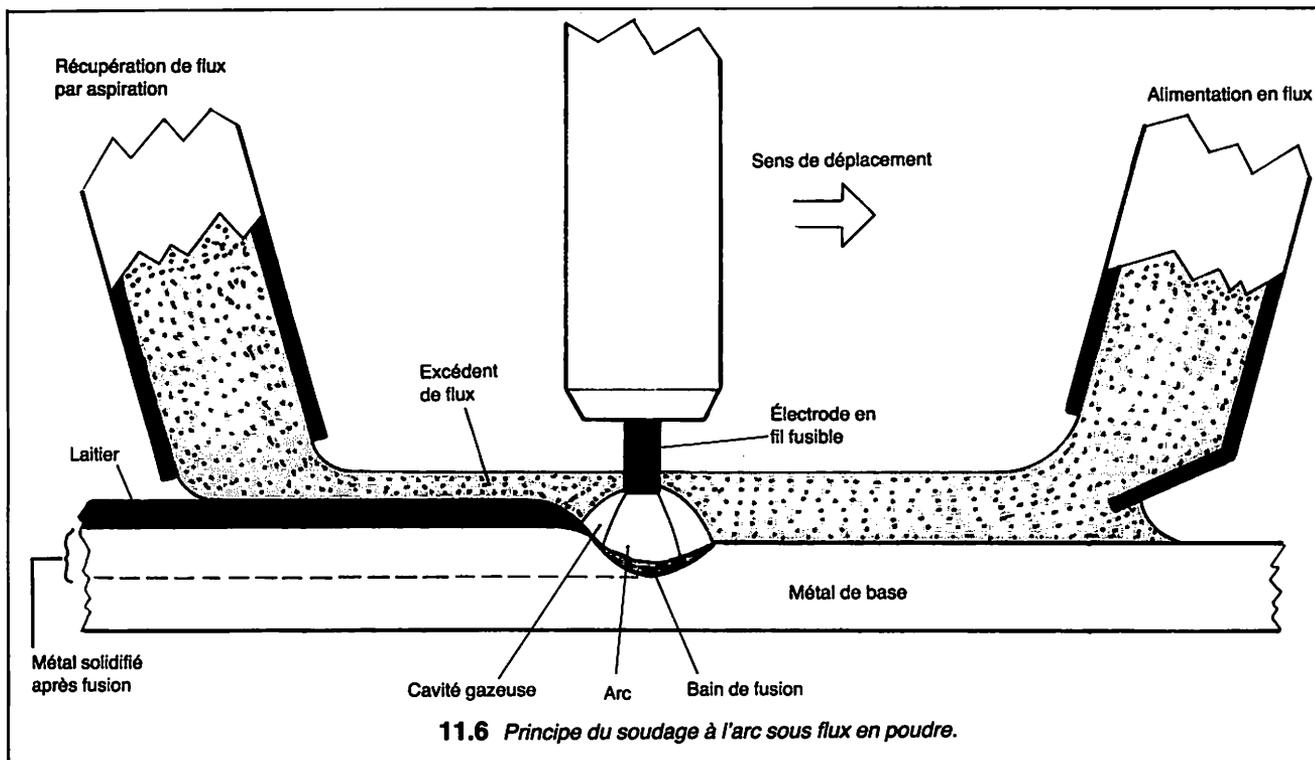
Le courant continu s'utilise jusqu'aux intensités de soudage de 500 à 600 Ampères, au-delà le courant alternatif permet d'éviter les inconvénients des déviations magnétiques de l'arc.

L'arc sous flux en poudre protège des rayonnements et est à l'abri des courants d'air mais le fait qu'il soit invisible impose le soudage automatique. Ce mode de soudage est adapté à l'industrie lourde et s'applique principalement aux aciers (au carbone, alliés ou inoxydable).

#### 5. SOUDAGE A L'ARC SOUS PROTECTION GAZEUSE AVEC ÉLECTRODE RÉFRACTAIRE : PROCÉDÉ TIG

Voir la figure 11.7

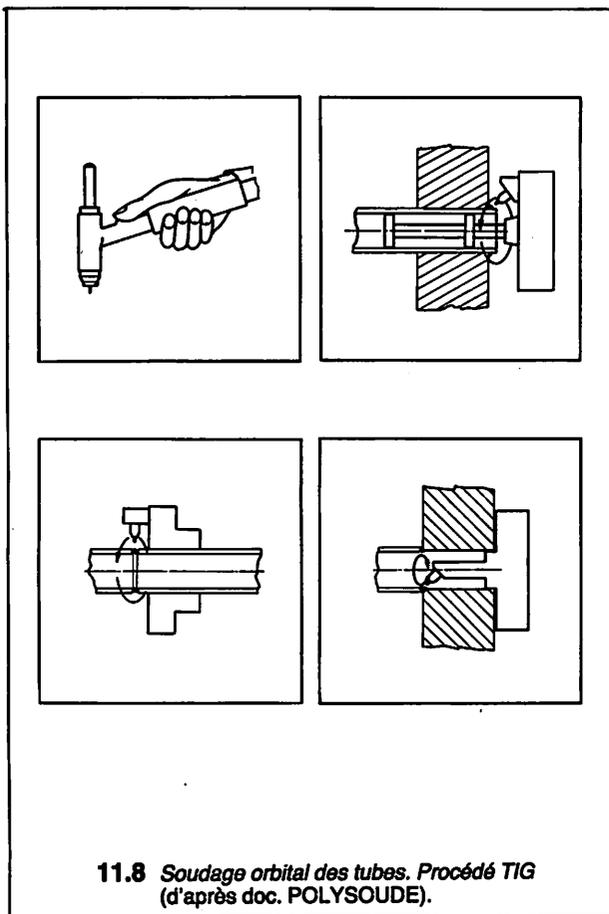
L'arc s'établit dans une atmosphère gazeuse inerte (Argon, Hélium) entre une électrode réfractaire (Tungstène) et la pièce qu'il



fait fondre localement. Le métal en refroidissant se solidifie et assure la liaison métallique recherchée. Une baguette d'apport peut être utilisée.

Pour les matériaux lourds (aciers, titane, alliages de nickel...) la soudure est réalisée en courant continu avec électrode directe, c'est-à-dire reliée au pôle « moins » de la source. Pour les matériaux légers (aluminium, magnésium, alliages légers...) une telle liaison électrique provoque sur le bain de fusion le dépôt d'une couche d'oxyde réfractaire qui s'oppose à l'assemblage des pièces. Cette pellicule peut être percée par le bombardement électronique émis depuis la pièce, si l'électrode est reliée au pôle « plus ». Le soudage est alors possible mais l'électrode soumise également au bombardement se détériore rapidement. Ce problème est solutionné par l'emploi d'un courant alternatif qui assure un décapage dit électronique.

Le procédé TIG doit éviter les courants d'air qui chassent le gaz protecteur, aussi sera-t-il employé de préférence sous abri. Il se prête bien à l'automatisation et il trouve notamment des applications dans les secteurs de l'aérospatiale, l'aéronavale, les échangeurs thermiques, en réalisant des soudures tubulaires bout à bout ou de type tube sur plaque. Voir la figure 11.8.

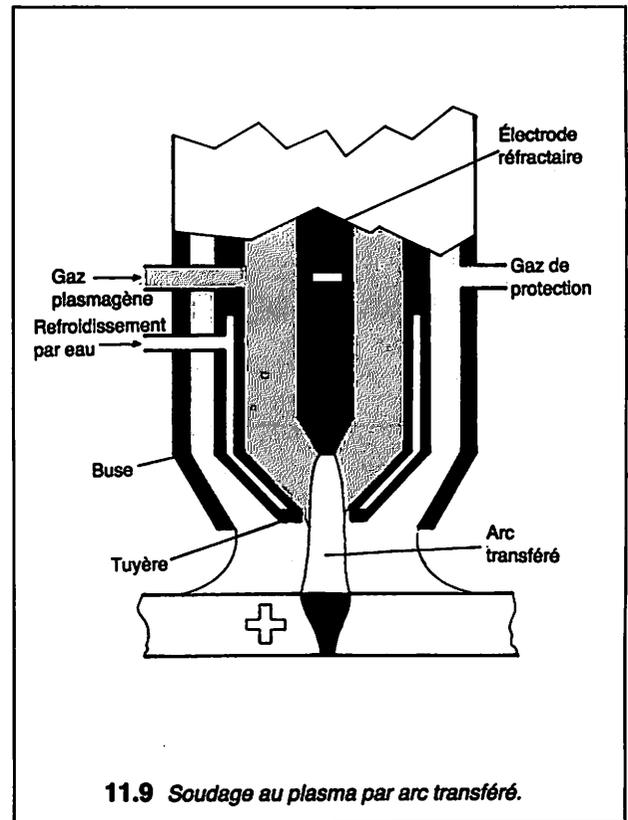


## 6. SOUDAGE AU PLASMA PAR ARC

Les effets combinés d'une température élevée et d'un champ électrique permettent d'ioniser un gaz.

Le gaz parfaitement ionisé est dit à l'état de « plasma ». Pour le soudage au plasma par arc, le gaz en partie ionisé est alors bon conducteur d'électricité et les différents filets de courant établis dans un même sens provoquent par actions électrodynamiques la concentration de la veine gazeuse dans l'axe de l'arc électrique. L'intensification de cet effet par la constriction du gaz, peut faire accroître jusqu'à 20 000 °C la température de la colonne centrale. L'arc est établi entre l'anode réfractaire en tungstène et la cathode qui peut être soit un élément de l'assemblage, soit une deuxième électrode. Dans le premier cas l'arc dit « transféré » est utilisé pour le soudage et la coupe. Dans le deuxième cas l'arc dit « soufflé » sert au soudage des pièces très minces et aux projections à chaud. Le soudage au plasma par arc transféré nécessite l'usage d'un gaz plasmagène (Argon, Hélium, mélanges) et l'apport d'un gaz de protection (Argon, Hydrogène) tenant le même rôle qu'au procédé TIG. Voir la figure 11.9.

Les déformations de l'assemblage dues au retrait sont à considérer mais l'obtention d'un échauffement élevé sur une faible surface favorise une grande pénétration de la soudure. La forme de la coupe du joint rappelle celle obtenue par bombardement électronique.



# 12. SOUDAGE PAR INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

## 11 INTRODUCTION

Le soudage par induction assure généralement l'assemblage par les actions combinées d'un chauffage localisé par induction et d'un effort de forgeage. Ce moyen permet, par exemple dans le cas du soudage en bout tel que le rabotage de tubes, de supprimer les problèmes d'amenée de courant aux pièces et d'assurer leur assemblage par échauffement des bords tout en diminuant le bourrelet par rapport aux procédés de soudage par résistance en bout ou par étincelage.

L'évolution des générateurs de courant, en moyenne et haute fréquence, liée aux progrès réalisés en électronique a permis de développer de nombreuses applications pour le chauffage, les traitements thermiques et la fusion des métaux.

dans laquelle  $k$  est un coefficient caractéristique de la substance, démontre que la puissance dissipée dans le circuit induit croît avec l'induction et la fréquence.

Dans le cas d'une application à fréquence industrielle (50 Hz),  $P_{CF}$  dépendra de la valeur de l'induction. Pour une utilisation à fréquence élevée (M.F et H.F) on peut réduire l'induction et supprimer ou employer un circuit magnétique incomplet.

### • Cas d'un corps conducteur ferro-magnétique

Lorsque la substance à chauffer est un corps ferro-magnétique d'une température inférieure à son point de Curie, l'effet thermique du phénomène d'hystérésis s'ajoute à celui provoqué par les courants induits.

$$P_H = k_H \cdot B^2 \cdot f \text{ (en régime alternatif sinusoïdal)}$$

### • Effet de peau

L'effet de peau également appelé effet pelliculaire, effet Kelvin ou effet de coque, caractérise la répartition des courants induits dans l'élément à chauffer. Plus la fréquence  $f$  augmente, plus les courants induits ont tendance à se concentrer en surface. La densité du courant décroît exponentiellement de la surface vers le cœur de la pièce, comme le montre la figure 12.2 courbe a. On considère l'épaisseur de pénétration comme étant celle dans laquelle on pourrait faire passer la totalité du courant à une densité constante égale à la densité du courant de surface  $J_0$ . On a alors environ 87 % de la puissance totale dissipée dans la couche d'épaisseur  $p$ . Voir la figure 12.2 courbe b.

Lorsque la profondeur de pénétration est petite devant le rayon de l'induit, l'expression de «  $p$  » peut s'écrire :

$$p = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}}$$

avec  $\rho$  = résistivité de l'induit  
 $\mu_0$  = perméabilité du vide =  $4\pi \cdot 10^{-7}$   
 $\mu_r$  = perméabilité relative  
 $f$  = fréquence utilisée

La profondeur de pénétration est donc une grandeur fictive qui dépend de la fréquence choisie pour la source inductrice et de la

## 2. PRINCIPE DU CHAUFFAGE PAR INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

### • Cas général

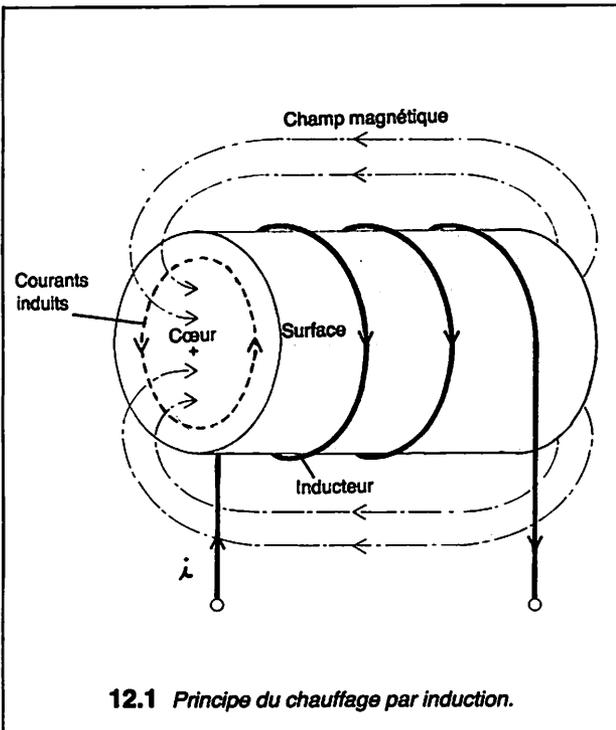
Tout corps conducteur de l'électricité placé dans un champ magnétique variable est le siège de forces électromotrices d'induction donnant naissance à des courants dits de Foucault. Ces courants induits dissipent de la chaleur par effet Joule et leur sens est tel qu'ils s'opposent à la cause qui les a engendrés.

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \text{ où } d\Phi \text{ est la variation du flux qui traverse l'induit pendant le temps } dt. \text{ Voir la figure 12.1.}$$

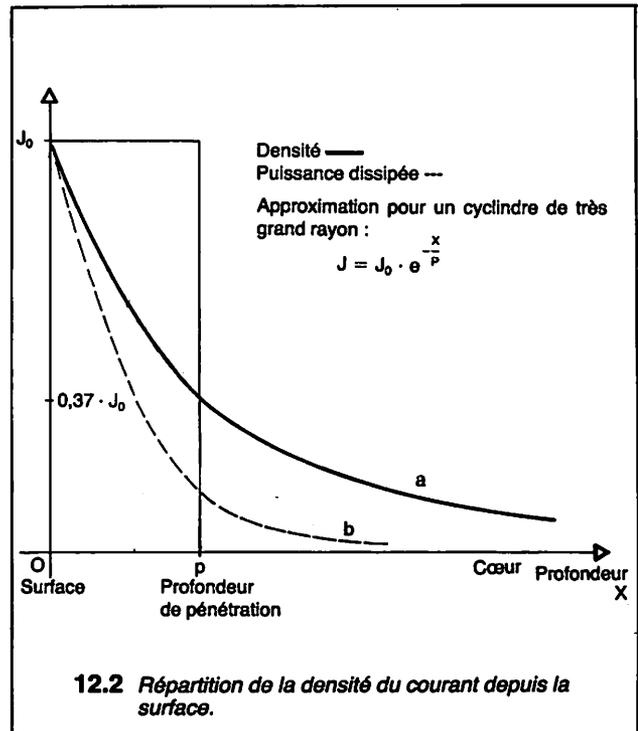
Si pour les machines on cherche à réduire les pertes dues à ces courants, pour un système de chauffage, on cherche au contraire à maîtriser l'énergie calorifique qu'ils dissipent.

L'expression établie en régime alternatif sinusoïdal :

$$P_{CF} = k_{CF} \cdot \frac{e^2}{\rho} \cdot \hat{B}^2 \cdot f^2 = k \cdot \hat{B}^2 \cdot f^2$$



12.1 Principe du chauffage par induction.



12.2 Répartition de la densité du courant depuis la surface.

nature du matériau à chauffer. Elle permet de localiser approximativement la zone de dégagement de chaleur. La pénétration de chaleur dépendant en effet de la puissance transmise, du temps de chauffage, de la conductibilité thermique du matériau ainsi que de son pouvoir émissif et de sa surface de refroidissement.

### 3. CHOIX D'UNE FRÉQUENCE

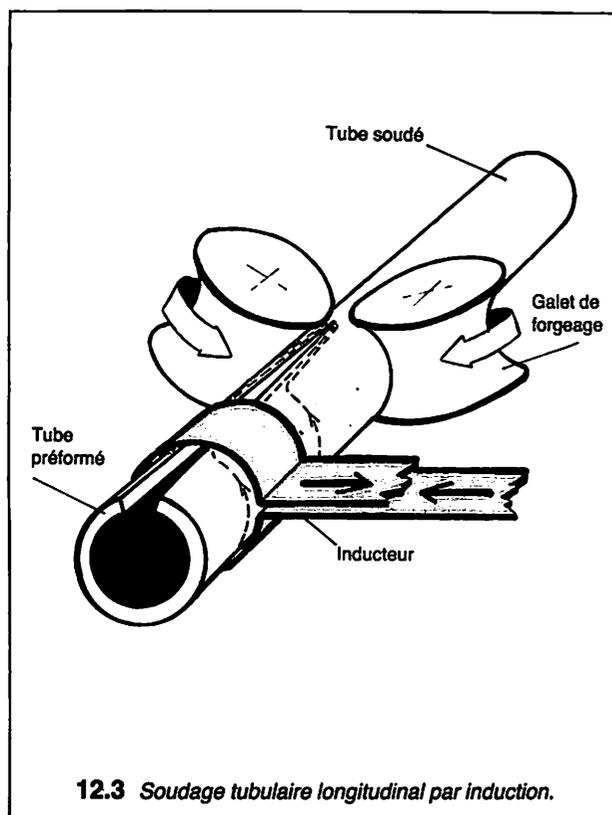
Le paragraphe précédent a montré qu'une élévation de la fréquence diminue la profondeur de pénétration. Il faut d'autre part remarquer que pour un même inducteur, la puissance transmise par induction augmente avec la fréquence.

Pour obtenir un chauffage localisé en surface les fréquences élevées s'imposent. Pour un chauffage régulier et en profondeur les basses et moyennes fréquences apportent une grande vitesse de chauffe et une bonne homogénéité.

Certaines applications ne nécessitent pas une grande régularité de chauffage, ni une localisation précise de la chaleur aussi, le choix de la fréquence dépend alors essentiellement de considérations économiques.

En général, les fréquences utilisées sont réparties en 3 classes :

- chauffage à basses fréquences : jusqu'à 500 Hz
- chauffage à moyennes fréquences : de 500 à 10 000 Hz
- chauffage à hautes fréquences : au-dessus de 10 k Hz.



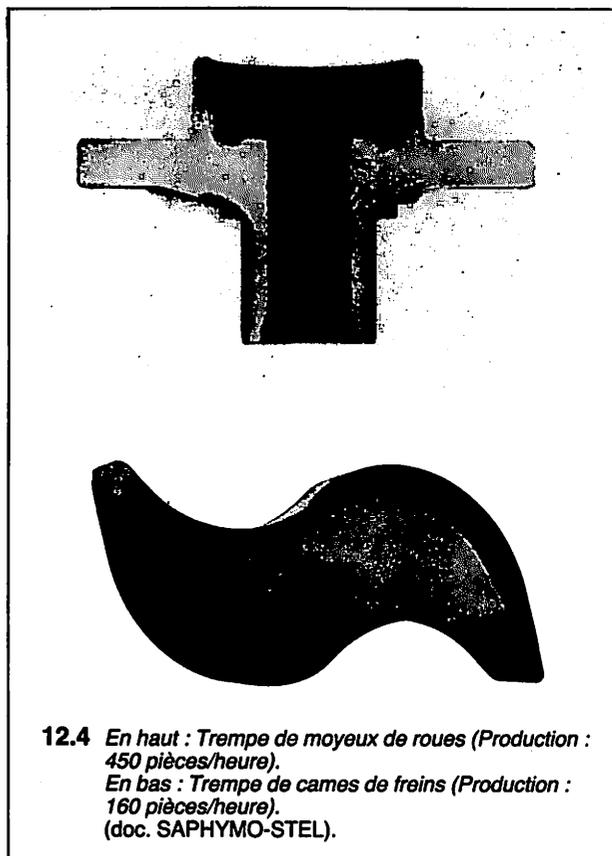
### 4. APPLICATION DU SOUDAGE PAR INDUCTION

Une des principales applications est la fabrication de tubes ou de profilés fermés. Le soudage longitudinal en haute fréquence (200 à 500 k Hz) de tubes métalliques consiste à chauffer et à forger les deux rives d'un feillard préalablement mis en forme. L'ébauche se déplace à l'intérieur d'un inducteur annulaire. Les courants induits se referment par le point de contact créé par les galets de forgeage, en effectuant l'aller par une lèvres du tube et le retour par l'autre, ce qui provoque un chauffage sélectif d'autant plus accentué que la fréquence est plus élevée. Seule la zone à souder est portée à haute température. Voir la figure 12.3.

Les cordons de soudure peuvent ensuite être recuits avec un chauffage par induction à moyenne fréquence.

### 5. EXEMPLES D'APPLICATIONS A L'AUTOMOBILE, DU CHAUFFAGE LOCALISÉ PAR INDUCTION

Les photos de la figure 12.4 montrent les coupes des pièces trempées pour une puissance installée de 125 kW et une fréquence de 10 k Hz.



# 13. SOUDAGE PAR HYSTÉRÉSIS DIÉLECTRIQUE

## 1. PRINCIPE

Considérons un diélectrique placé entre deux armatures dans un champ électrique variable de direction constante. Le phénomène d'hystérésis diélectrique est mis en évidence sur la courbe 13.1 représentant  $P=f(E)$  c'est-à-dire la variation de la polarisation du diélectrique en fonction du champ électrique.

On démontre que l'énergie dissipée au cours d'un cycle est mesurée par l'aire du cycle. L'échauffement résultant est à la base du chauffage diélectrique à haute fréquence.

## 2. PARAMÈTRES

Pour une substance isolante donnée, la constante diélectrique et l'angle de pertes sont fixés.

### • Action sur la tension

En augmentant la d.d.p.  $U$  appliquée entre les armatures on peut accroître l'énergie ( $W = \frac{1}{2} CU^2$ ) emmagasinée dans le condensateur

mais cette élévation est limitée par la tension de décharge disruptive entre les armatures.

### • Action sur la fréquence

Pour une unité de temps (la seconde), l'énergie dissipée croît avec le nombre de cycles d'hystérésis décrits. Pour augmenter le chauf-

fage, les fréquences des tensions appliquées sont donc très élevées et comprises entre 5 et 50 MHz.

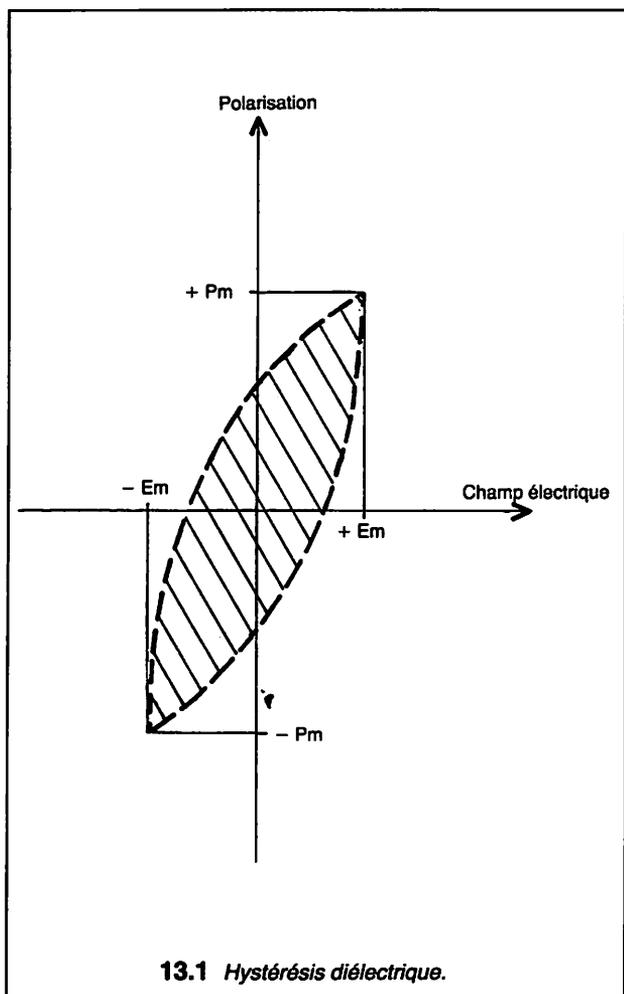
## 3. PROPRIÉTÉS ESSENTIELLES

L'échauffement se fait dans la masse de l'isolant traité et il est uniforme si la matière est homogène. Dans le cas de plusieurs matériaux aux caractéristiques diélectriques différentes, les échauffements seront sélectifs. Le contact avec les armatures n'est pas nécessaire.

## 4. APPLICATIONS

En soudage, des résines thermo-plastiques en feuilles sont pressées entre 2 électrodes ou 2 molettes soumises à une tension élevée de haute fréquence. On fabrique aussi des éléments de garnitures de carrosseries, emballages... Les pertes diélectriques permettent encore d'effectuer :

- un pré-chauffage (préparation au pressage de résines thermosensibles...)
- un séchage (matières textiles, vernis, produits alimentaires...)
- une cuisson (produits alimentaires...)
- une fusion (pâtes à bonbons, chocolat...)
- une destruction de parasites dans la farine, le cacao... etc.



## 5. RAPPEL THÉORIQUE : PUISSANCE DISSIPÉE DANS LE DIÉLECTRIQUE

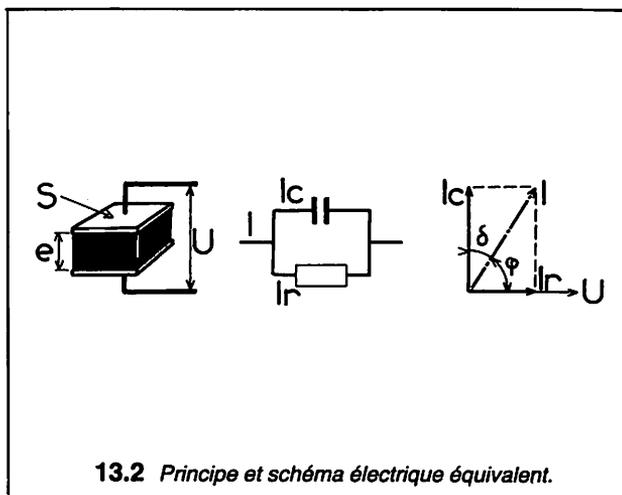
$$P = U I \cos \varphi = U I \operatorname{tg} \delta = U^2 C \omega \operatorname{tg} \delta = U^2 C 2\pi f \operatorname{tg} \delta$$

$$\text{Pour un condensateur plan : } C = \epsilon_0 \epsilon_r \cdot \frac{S}{e} \text{ et } E = \frac{U}{e}$$

$$\text{soit } P = 2\pi \epsilon_0 S e f E^2 \epsilon_r \operatorname{tg} \delta \text{ avec } \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\text{N F/m}^2 \text{ m Hg V/m}$$

La puissance dissipée dépend donc du volume utile  $S.e$ , de la fréquence  $f$ , du carré du champ électrique  $E^2$  et du facteur de perte du matériau  $\epsilon_r \cdot \operatorname{tg} \delta$  (fig. 13.2).



## Thème 6

# L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Toutes les civilisations évoluées font appel à l'énergie électrique et le niveau de vie de leurs habitants est lié à la consommation de cette énergie.

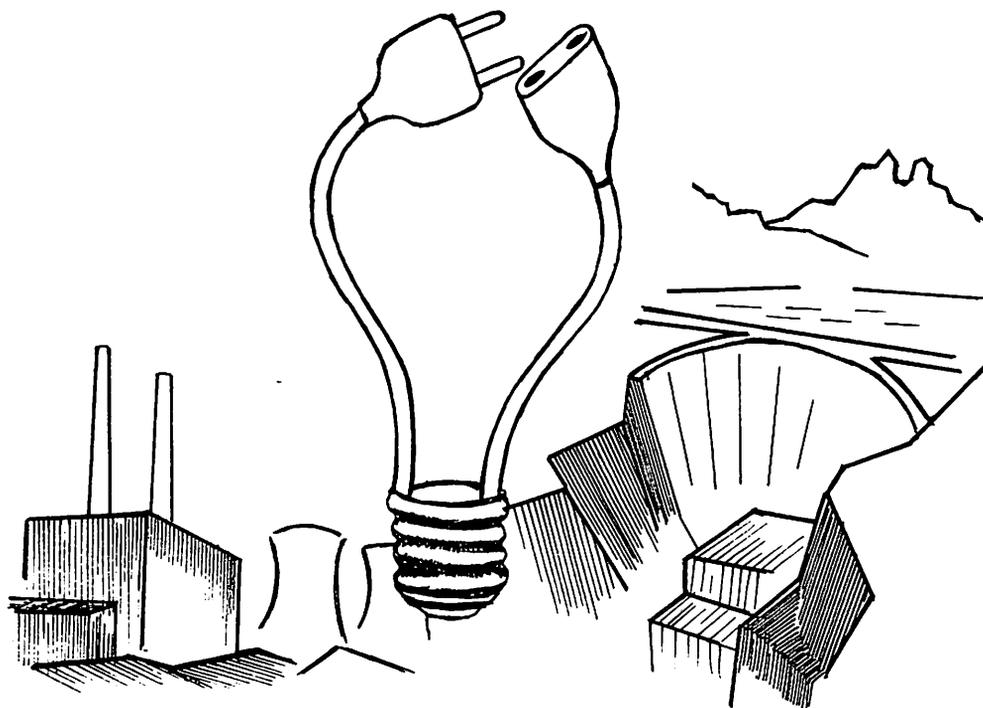
La **production massive** de l'énergie électrique sur quelques sites et son **transport à grande distance** présentent des avantages considérables.

Sa souplesse d'emploi et sa conversion en toutes autres formes d'énergies par l'utilisateur lui donnent un champ d'applications constamment élargi.

Ce thème s'intéresse aux moyens de production de l'énergie électrique au niveau national par les grandes centrales de l'Électricité de France, ainsi qu'aux moyens de production regroupés sous l'appellation « énergies nouvelles ».

### SOMMAIRE

1. L'énergie électrique
    1. L'énergie
    2. Rappels des grandeurs physiques
  2. Centrales électriques hydrauliques
    1. Usine de haute chute
    2. Usine de moyenne chute
    3. Usine marémotrice
  3. Centrales électriques à flamme
    1. Notions de thermodynamique
    2. Cycle thermique de la turbine à vapeur
    3. Constitution d'une centrale thermique
  4. Centrales électriques nucléaires
    1. Rappels de physique nucléaire
    2. Réaction de fission
    3. Technologie de l'uranium
    4. La fusion thermonucléaire
    5. Centrale nucléaire
    6. Surrégénérateur
    7. Centrale Super Phénix
  5. L'alternateur
    1. Constitution générale
    2. Stator
    3. Rotor
    4. Refroidissement
    5. Excitation de l'alternateur
    6. Caractéristiques
  6. Transport de l'énergie électrique
    1. Classement des lignes haute tension
    2. L'interconnexion
    3. Lignes haute tension
    4. Les postes d'interconnexion
    5. Mouvements d'énergie
  7. Énergies nouvelles
    1. Énergie solaire
    2. Capteur photovoltaïque
    3. Centrale électrique Thémis
    4. Énergie éolienne
- Annexe : Les découvertes relatives à l'énergie nucléaire



# 1. L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

## 1. L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

L'énergie vient du grec « dedans » et « force ou travail ».

L'énergie est à la base du développement de toutes les sociétés humaines. Du premier feu de forge à la combustion hydrogène – oxygène d'une fusée, en passant par les moulins à eau ou à vent, la longue démarche de l'homme a consisté à dompter les éléments énergétiques.

L'énergie la plus utilisée est l'énergie obtenue à partir de la chaleur. La production de chaleur à partir de combustibles fossiles ou nucléaires constitue le moyen essentiel de libération de l'énergie (voir fig. 1.1).

Le soleil, siège d'une réaction thermonucléaire, couvre le globe terrestre d'une énergie évaluée à 1 kW par m<sup>2</sup>. Il est l'agent d'évaporation des eaux de mer qui s'accumulent, par la pluie et la neige, en altitude et représentent une énergie potentielle. Parallèlement il crée des différences de températures dans les zones atmosphériques et stratosphériques, qui sont à l'origine des vents. Les combinaisons chimiques de certains corps développent également de la chaleur mais leur importance est réduite.

C'est le principe de Carnot qui régit la libération d'énergie thermique :

$$W = E(Q_1 - Q_2) \text{ avec } \begin{cases} W \text{ joules} \\ E \text{ équivalent mécanique de la chaleur} \\ Q_1 \text{ quantité de chaleur d'un fluide à la température } T_1 \\ Q_2 \text{ quantité de chaleur d'un fluide à la température } T_2 \end{cases}$$

avec  $T_1 - T_2 > 0$  la libération est exothermique

Toutes les machines ou systèmes producteurs d'énergie thermique sont construits à partir du passage d'un fluide d'un certain niveau de température  $T_1$  à un niveau plus bas  $T_2$  et ceci jusqu'au niveau le plus bas  $T_0$  ou zéro absolu ( $-273^\circ\text{C}$ ). Malheureusement cette énergie thermique se dégrade constamment, n'est pas stockable sur de longues durées et difficilement transportable.

Toutes les transformations ultérieures notamment en énergie mécanique ou en énergie électrique visent une utilisation immédiate ou comme on dit maintenant « en temps réel ». L'énergie électrique ayant l'énorme avantage d'être transportable.

Nous traiterons directement de l'énergie électrique. Il faut cependant noter que jusqu'à présent la conversion passe toujours par des cycles chaleur → vapeur → mécanique → électricité.

Les unités correspondant à la chaleur sont de plus en plus directement converties en unités mécaniques et électriques.

## 2. RAPPEL DES GRANDEURS PHYSIQUES DE L'ÉNERGIE

### • Unités d'énergie thermiques – mécaniques

La potentialité des énergies fossiles (charbon, pétrole) s'expriment sous la forme d'une énergie massique.

La tonne équivalent pétrole (t.e.p.) vaut  $4,18 \cdot 10^{10}$  joules

La tonne équivalent charbon (t.e.c.) vaut  $2,93 \cdot 10^{10}$  joules

$$1 \text{ t.e.p.} \approx 1,5 \text{ t.e.c.}$$

Cette équivalence repose sur une conversion énergétique parfaite, sans déperdition, ce qui n'est évidemment pas le cas dans les chaudières et les moteurs ou turbines.

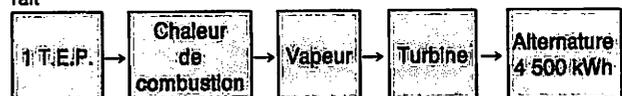
Dans une centrale électrique :

Pour produire  $10^6$  kWh (1 million de kilowatts-heure) il faut environ :

- 333 tonnes de charbon
- 222 tonnes de pétrole
- 4 tonnes d'uranium enrichi (25 tonnes d'uranium naturel).

Avec un surrégénérateur ces 25 tonnes d'uranium naturel produisent environ 60 fois plus d'énergie électrique.

Par exemple la combustion pétrole (plus exactement fioul) donnerait



Malgré la disparition progressive des unités de chaleur nous rappelons les suivantes :

Calorie I T (internationale) 4,1868 joules.

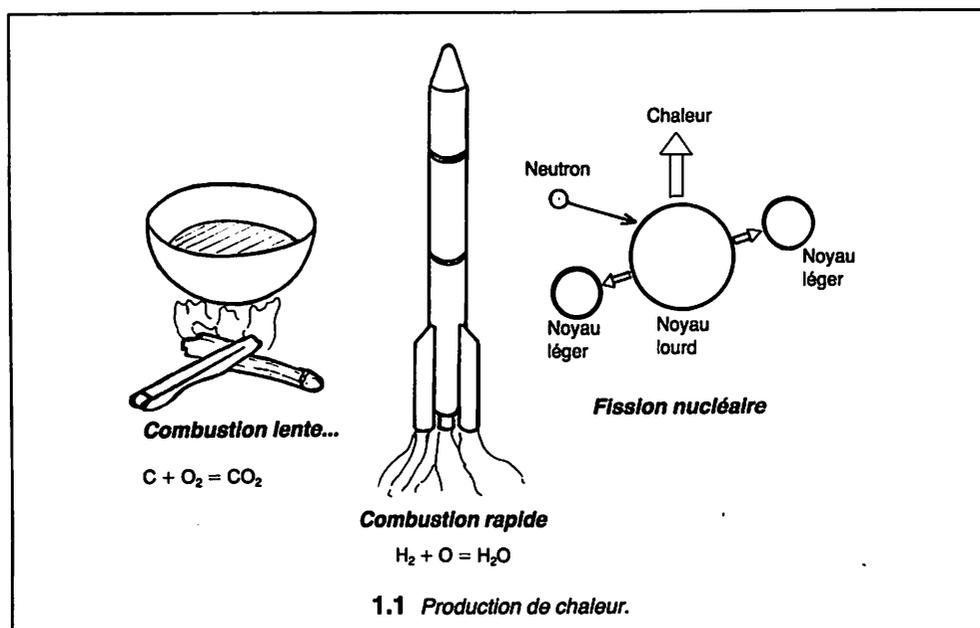
La chaleur nécessaire pour élever 1 g d'eau de  $14^\circ\text{C}$  à  $15^\circ\text{C}$  équivaut à 4,1855 joules.

Thermie  $4,1855 \cdot 10^6$  joules (1 T.E.P. libère environ  $10^4$  thermies).

Équivalences volumiques anglo-saxonnes :

1 baril U S =  $0,158987 \text{ m}^3$  ou 42 gallons

1 gallon = 3,785 litres.



• **Unités d'énergie électrique**

La physique fondamentale utilise l'électron-volt : eV  
 C'est l'énergie libérée par un électron dont le niveau de potentiel diminue de 1 volt =  $1,60219 \cdot 10^{-19}$  joule  
 Multiples MeV =  $10^6$  eV  
 GeV =  $10^9$  eV

L'électricité industrielle utilise le kilowatt-heure : kWh énergie fournie par un générateur d'une puissance de 1 000 joules par seconde (1 000 watts) pendant une heure.

Le tableau d'équivalences admet des conversions sans pertes d'énergie.

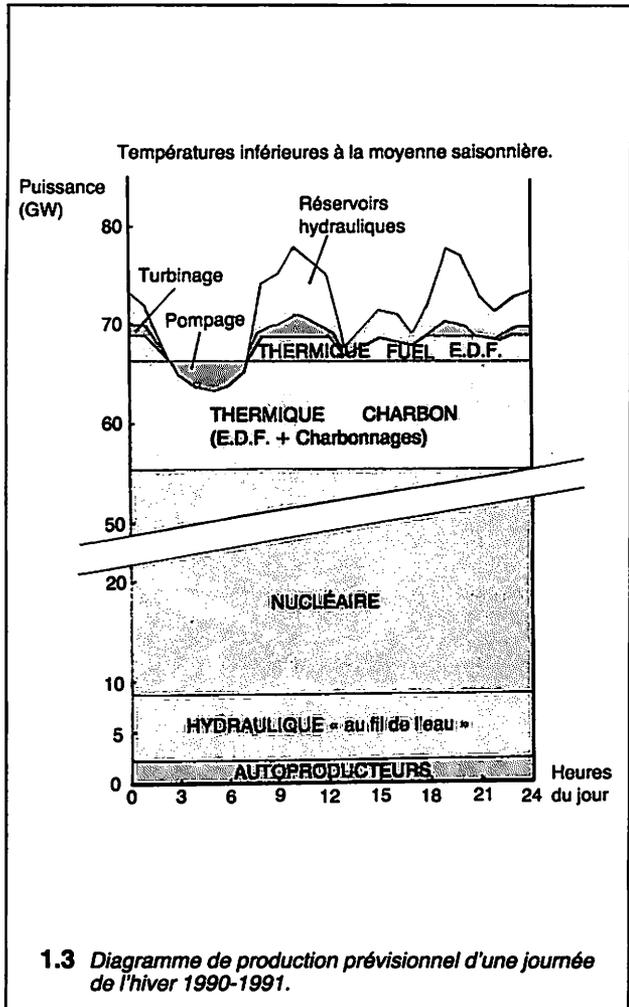
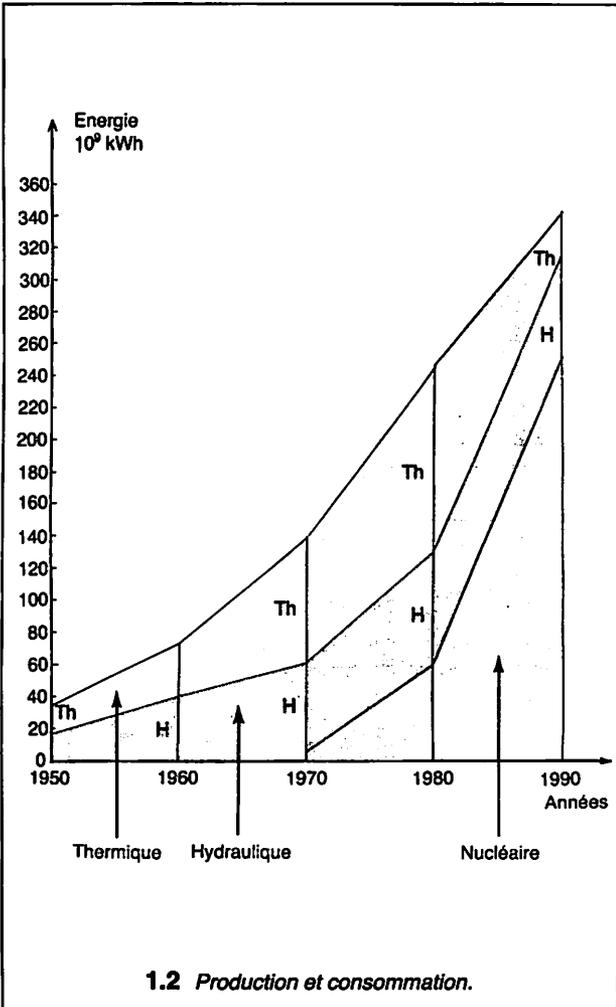
La combustion du fioul citée plus haut donnait 4 500 kWh pour 1 T.E.P., ce qui situe le rendement global de cette centrale électrique à  $\frac{4\,500}{11\,611} = 0,38$ .

1 kWh =  $3,6 \cdot 10^6$  joules

Énergie massique des combustibles	Énergie thermique de l'eau entre $T_1 - T_2 = 1\text{ }^\circ\text{C}$			Énergie mécanique en joules	Énergie électrique $W = P \times t$
	Volume	Poids	Chaleur		
1 m <sup>3</sup> gaz naturel (coef. 10,90) 1 T.E.C. 1 T.E.P.	1 cm <sup>3</sup>	1 g	1 calorie	1 joule	1 joule = 1 watt × 1 s
	1 dm <sup>3</sup>	1 kg	10 <sup>3</sup> calories	4,18 joules	
	1 m <sup>3</sup>	1 T	10 <sup>6</sup> calories = 1 thermie	4,18 · 10 <sup>6</sup> joules	
			0,86 thermies	3,6 · 10 <sup>6</sup> joules	1 kWh = 1 kW × 3 600 s
		9,387 th.	39,24 · 10 <sup>6</sup> joules		10,90 kWh
		7 112 th.	2,973 · 10 <sup>10</sup> joules		8 258 kWh
		10 000 th.	4,18 · 10 <sup>10</sup> joules		11 611 kWh

• **Production d'électricité**

Elle est étroitement liée à la consommation c'est-à-dire multipliée par huit environ entre 1950 et 1983 (1/3 de siècle). Cette croissance doit s'infléchir dans la décade 1990-2000, et le parc des centrales nucléaires n'augmenter que très lentement. Le graphe (1.2) donne la production et la consommation. La prévision relative à une journée de production de l'hiver 1990-1991 apparaît sur le graphe figure 1.3. On remarque que l'hydraulique, le nucléaire et le charbon constituent les bases de cette production, les variations dues aux pointes journalières sont compensées par le thermique fioul et les réservoirs hydrauliques.



## 2. CENTRALES ÉLECTRIQUES HYDRAULIQUES

L'équipement hydro-électrique de l'EDF comprend environ 500 aménagements représentant une puissance installée de 16 000 MW (somme des puissances de tous les alternateurs) et une productivité annuelle moyenne de 55 milliards de kWh (environ 25 % de la production totale).

Les ouvrages sont essentiellement de 4 types :

- Les barrages de basses chutes de hauteur inférieure à 30 m.
- Les barrages de moyennes chutes de hauteurs comprises entre 50 et 150 m.
- Les barrages de hautes chutes de hauteurs supérieures à 200 m.
- Les barrages destinés à créer des réservoirs en altitude pour les centrales de pompage.

A ces 4 types d'installations correspondent des groupes (turbines + alternateurs) exploitant au mieux le débit et la pression de l'eau. L'énergie potentielle est donnée par la relation :

$W \text{ joules} = m \cdot g \cdot H$ , dans laquelle  $m = V \cdot \rho$

avec	m	masse en kg de l'eau
	V	volume en m <sup>3</sup>
	ρ	masse volumique en kg/m <sup>3</sup>
	g	l'accélération de la pesanteur
	H	hauteur totale de la chute en m

En faisant intervenir le temps on obtient la puissance :

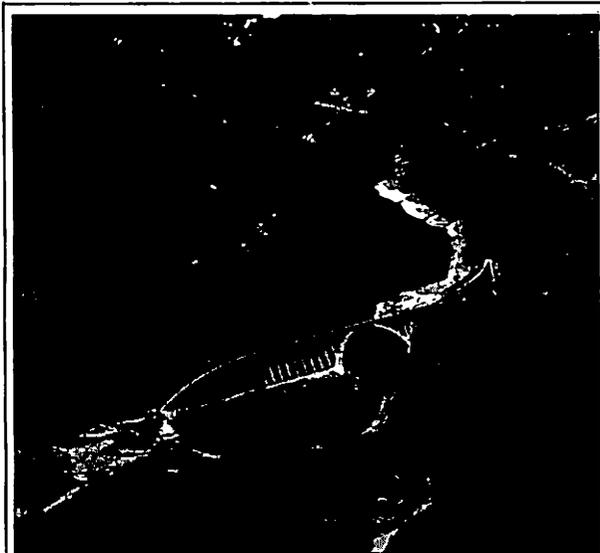
$$P \text{ watts} = \frac{W}{t} = \frac{V \rho g H}{t} \quad D = \frac{V}{t} \text{ est le débit en m}^3/\text{s}$$

Le produit  $D \times H$  (débit  $\times$  hauteur) caractérise la potentialité d'une chute d'eau.

Il conditionne le choix de la turbine selon les paramètres : débit, pression, vitesse et par conséquent de l'alternateur : vitesse, nombre de pôles.

L'équipement d'une chute d'eau comprend :

- Les ouvrages de génie civil et les conduites d'amenée d'eau.
- Les turbines.
- Les alternateurs avec leur station de raccordement au réseau.
- L'usine proprement dite, parfois souterraine, est un hall de grandes dimensions équipé de ponts roulants, abritant l'ensemble des groupes, les auxiliaires et les pupitres de commande.



2.1 Barrage de Roselend. (doc. SODEL).

### 1. USINE DE HAUTE CHUTE

Exemple : La Bathie - Roselend (Savoie)

#### • Ouvrages de génie civil

Le barrage de Roselend (fig. 2.1) a une longueur de 804 m. Il associe une voûte mince de 20 m à la base et de 140 m de hauteur à un barrage à contreforts.

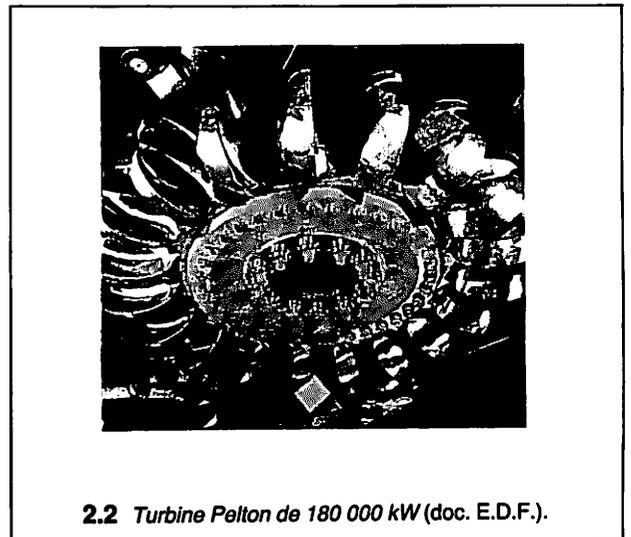
La retenue est de 187 millions de m<sup>3</sup> d'eau. Avec une hydraulicité moyenne cette réserve autorise un fonctionnement à pleine puissance de 2 000 heures/an soit environ 1 000 GWh.

L'usine de la Bathie située 1 200 m plus bas est alimentée par des conduites forcées de 1,60 m de diamètre et de 12 600 m de longueur. Les tubes sont autofrettés, d'épaisseur 12 mm environ en acier haute résistance et soutenus par des massifs d'ancrage dans une galerie souterraine. La pression est considérable au point bas : 120 bars ou  $120 \cdot 10^3$  hPa.

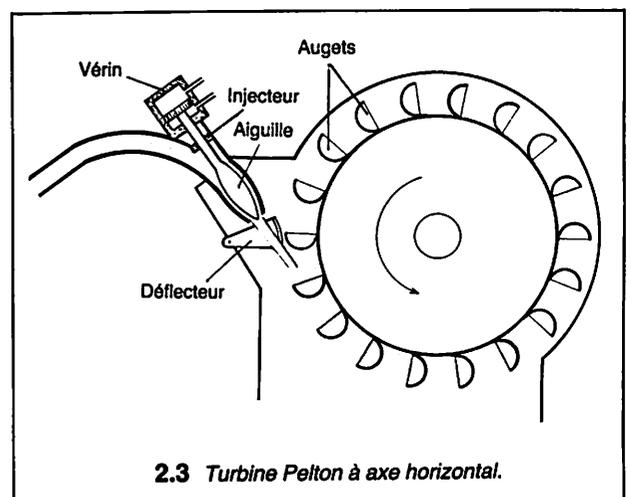
#### • Turbine (fig. 2.2)

La turbine Pelton à axe vertical et 2 injecteurs convient pour les hautes chutes. Il existe d'autres configurations : axe horizontal, un ou deux injecteurs.

La roue à augets de la turbine est attaquée par les jets tangentiels dont le débit est régulé par l'aiguille. Des déflecteurs peuvent dévier ces jets pour des arrêts d'urgence (fig. 2.3).



2.2 Turbine Pelton de 180 000 kW (doc. E.D.F.).



2.3 Turbine Pelton à axe horizontal.

La roue de la turbine a un diamètre de 3,25 m et tourne à la vitesse de 428 tr/min (vitesse périphérique 72 m/s). La vitesse d'emballement = 1,9 fois la vitesse nominale soit 136 m/s constitue la vitesse limite. Des précautions sont à prendre : fermeture des déflecteurs, charge de l'alternateur, pour éviter cette situation. La turbine transforme l'énergie potentielle de l'eau en énergie cinétique (aux pertes de charge et au rendement près).

$$W_p = W_c \quad m g H = 1/2 m V^2$$

Les conduites d'un débit total de 50 m<sup>3</sup>/s alimentent les 6 groupes turbo-alternateurs.

La puissance brute pour ce débit est

$$P = \frac{V}{t} \rho g H = 50 \times 1\,000 \times 9,81 \times 1\,200 = 588\,600 \text{ kW}$$

On admet une perte de charge dans la conduite de 10 mCè ce qui réduit la hauteur nette à la turbine à 1 190 m. H = 1 190 m (voir 1.1).

Pour chaque turbine la puissance brute à l'entrée de la turbine serait 97 282 kW.

La vitesse de l'eau est donnée par

$$v = \sqrt{2g \times H} = \sqrt{2 \times 9,81 \times 1\,190} = 152,8 \text{ m/s.}$$

La turbine a 2 injecteurs de diamètres 0,18 m.

Chaque injecteur débite par seconde une masse d'eau correspondant à un cylindre de 0,18 m de diamètre et de 152,8 m de longueur.

$$V = \pi R^2 L = 3,14 \times 0,09^2 \times 152,8 = 3,886 \text{ m}^3 \quad \text{donc } m = 3\,886 \text{ kg}$$

$$\text{et pour les 2 injecteurs} \quad m = 7\,772 \text{ kg}$$

L'énergie cinétique  
 $W_c = 1/2 m V^2 = 1/2 \times 7\,772 \times 152,8^2 = 90\,729 \text{ kJ}$   
 Comme il s'agit de l'énergie disponible par seconde, la puissance est de 90 729 kW ce qui donne à la turbine un rendement de =

$$\frac{90\,729}{97\,282} = 0,93$$

Avec un rendement de 0,92 l'alternateur débite 83 500 kW.

La puissance installée totale de l'usine est de  
 $6 \times 83\,500 \sim 500\,000 \text{ kW.}$

#### • Alternateur

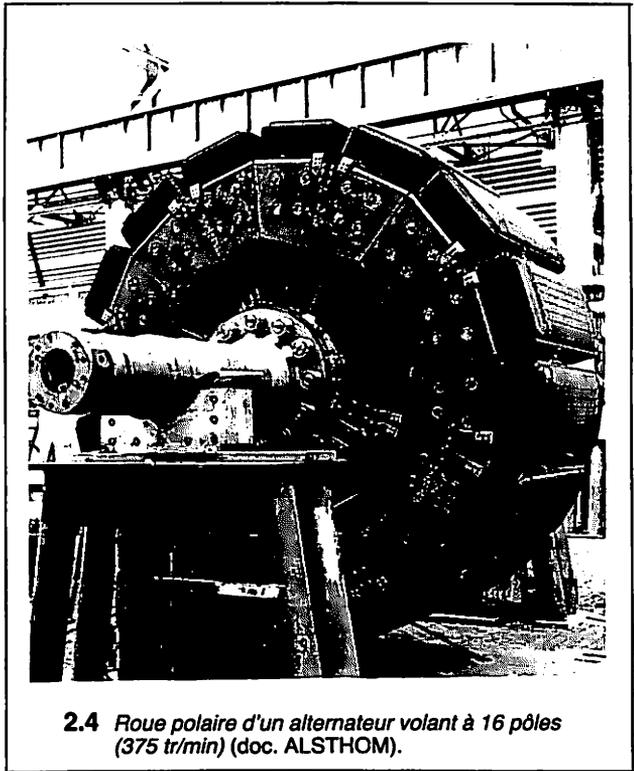
La vitesse de 428 tr/min détermine le nombre de pôles de l'alternateur pour obtenir une fréquence de 50 Hz :  $f = p n$

$$p = \frac{50 \times 60}{428} = 7 \text{ soit } 14 \text{ pôles.}$$

La roue polaire ou inducteur comporte donc 14 pôles alimentés par une excitatrice génératrice à courant continu montée en bout d'arbre. Cet alternateur dit « volant » à pôles saillants a un stator triphasé analogue à celui de moteurs triphasés. Le refroidissement est assuré par ventilation dans l'air ambiant (fig. 2.4).

La régulation en tension s'effectue selon les principes développés (Tome 1 – thème 5 – Groupe électrogène).

La régulation en fréquence est obtenue par une régulation de vitesse de la turbine (dans ce cas réglage de l'aiguille des injecteurs).



2.4 Roue polaire d'un alternateur volant à 16 pôles (375 tr/min) (doc. ALSTHOM).

## 2. USINE DE MOYENNE CHUTE

Exemple : Serre-Ponçon (fig. 2.5)

#### • Ouvrages de génie civil

Le barrage rectiligne est de type poids. Dans ce cas particulier, en l'absence d'ancrages possible sur les flancs de la gorge, le barrage est construit en argile au centre avec un amoncellement tronconique de terre de part et d'autre. Il présente l'aspect d'une digue de très grande épaisseur (600 m à la base, quelques mètres au sommet) pour une hauteur de 130 m environ. La retenue est de 1,2 milliard de m<sup>3</sup> d'eau. La productivité moyenne est de  $700 \cdot 10^6 \text{ kWh}$  par an. Pour ces mêmes chutes les barrages poids-voûte classiques en béton ont une large assise (100 m à la base, 10 m au sommet pour 100 m de hauteur) et une forme en voûte concave de telle sorte que le béton travaille uniquement à la compression. Dans ce cas les ancrages sur les flancs de la vallée jouent un rôle prépondérant.



2.5 Barrage - Usine de Serre-Ponçon. (doc. SODEL).

### • Turbine

L'usine est équipée de 4 turbines Francis (fig. 2.6).

La turbine Francis adaptée aux moyennes chutes est à axe vertical. L'eau est admise dans une bache spirale ou volute dont la section se réduit progressivement sur la circonférence. Le débit est réglé par un distributeur constitué de pales mobiles.

La roue centrale à aubes reçoit la poussée de l'eau – dont la vitesse est relativement faible – et transforme l'énergie due à la pression de l'eau en énergie mécanique.

L'évacuation de l'eau par un diffuseur limite sa vitesse de sortie et améliore le rendement de la turbine.

La vitesse de rotation est de 214 tr/min et la vitesse d'emballement limitée à 2,2 fois la vitesse nominale (470 tr/min). Chaque turbine dispose d'une puissance brute maximale (avec un débit unitaire de

$$75 \text{ m}^3/\text{s}) \text{ de } P = \frac{v \cdot gH}{t} = 75 \times 1\,000 \times 9,81 \times 123 = 90\,500 \text{ kW.}$$

Avec un rendement de 0,9 pour cette turbine la puissance utile est 81 450 kW un rendement de 0,92 pour l'alternateur, chaque groupe a une puissance de 75 000 kW (fig. 2.7).

### • Alternateur

La vitesse de 214 tr/min exige un inducteur à 28 pôles. C'est un inducteur à rainures parallèles (inducteur lisse) de grand diamètre. Les régulations sont analogues à celles de l'alternateur précédent. Le montage vertical repose sur un palier pivot-guide. La rotation de l'ensemble roue de la turbine, axe de transmission, rotor de l'alternateur n'est possible qu'après admission d'un film d'huile sous pression dans le palier. L'ensemble est alors soulevé de quelques  $\mu\text{m}$ . Un dispositif de sécurité est garant de la pression d'huile indispensable.

Exemple de rotor : fig. 2.8.

## 3. USINE MARÉMOTRICE

### Exemple : la Rance

C'est une usine de basse chute particulière utilisant le flux et le reflux de la mer dans un site privilégié : un estuaire siège de fortes marées.

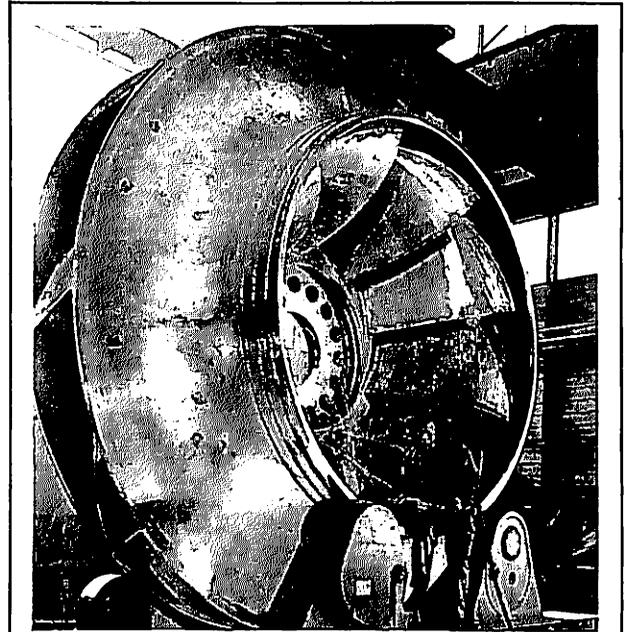
### • Ouvrages de génie civil

C'est un barrage rectiligne avec une écluse pour la navigation (fig. 2.9). Ce barrage d'environ 25 m de hauteur totale est creux et constitue une longue galerie dans laquelle sont installés les groupes. Des ponts roulants facilitent leur manutention pour l'entretien.

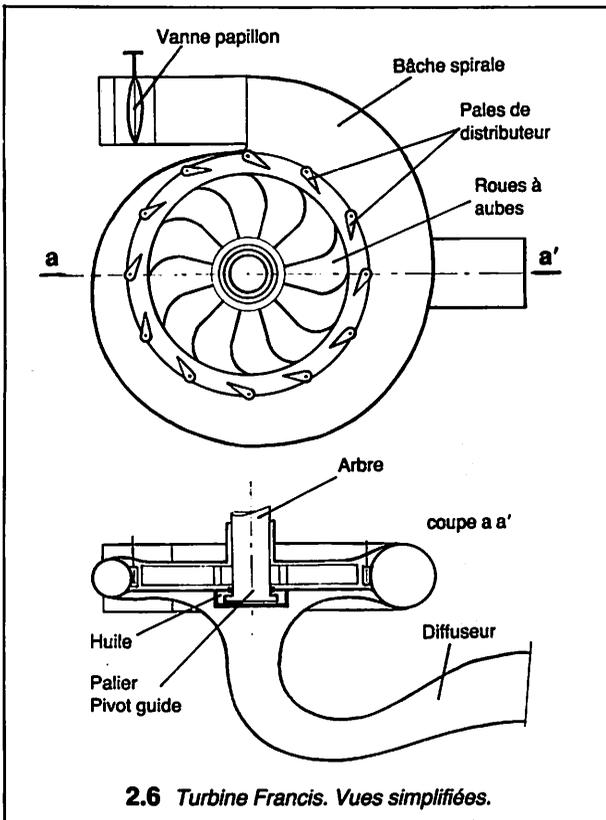
La retenue se remplit selon le rythme des marées 2 fois par 24 heures.

Le turbinage s'effectue dans les deux sens selon l'orientation des pales des hélices. Un troisième mode de marche consiste à utiliser le groupe en pompe en l'alimentant par le réseau. La retenue constitue en effet une réserve hydraulique qu'on peut avoir intérêt à remplir en heures creuses (de nuit) pour en disposer en heures de pointe.

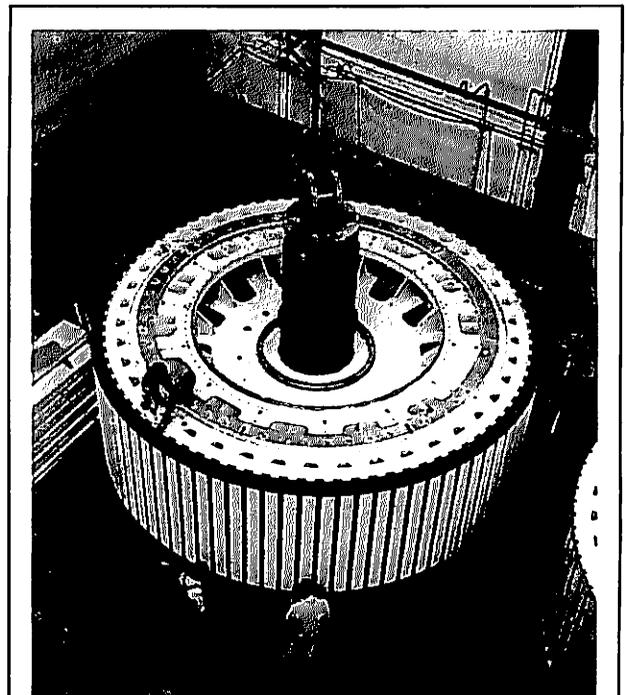
La productibilité annuelle théorique est de 544 millions de kWh.



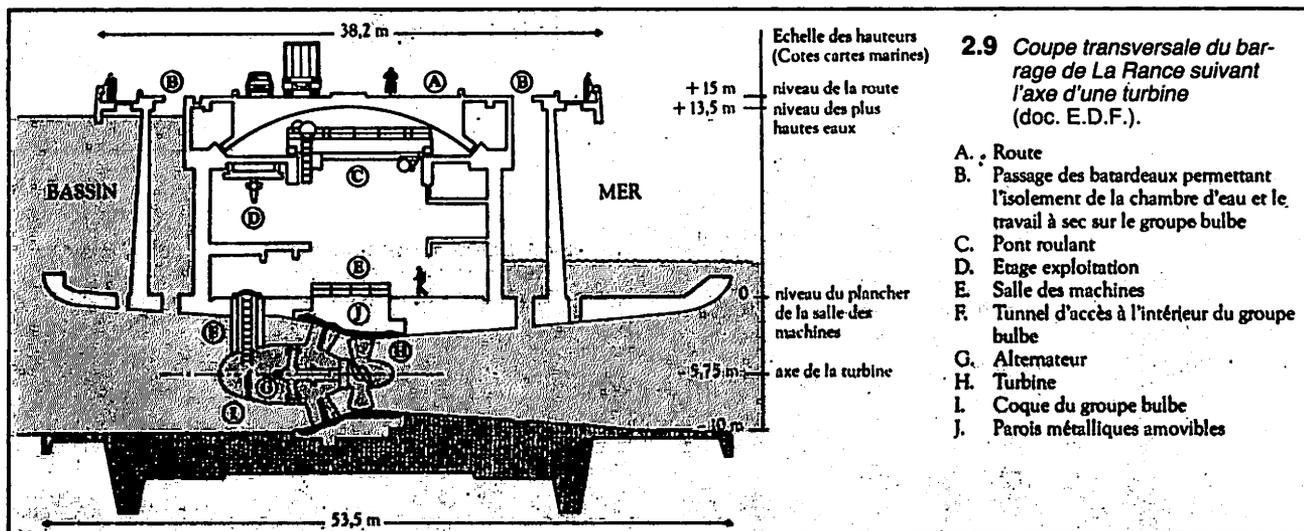
2.7 Roue à aubes d'une turbine Francis (doc. E.D.F.).



2.6 Turbine Francis. Vues simplifiées.



2.8 Rotor d'alternateur 54 000 kVA ; 85,7 tr/min ; 60 Hz (doc. ALSTHOM).



### • Turbo-alternateur

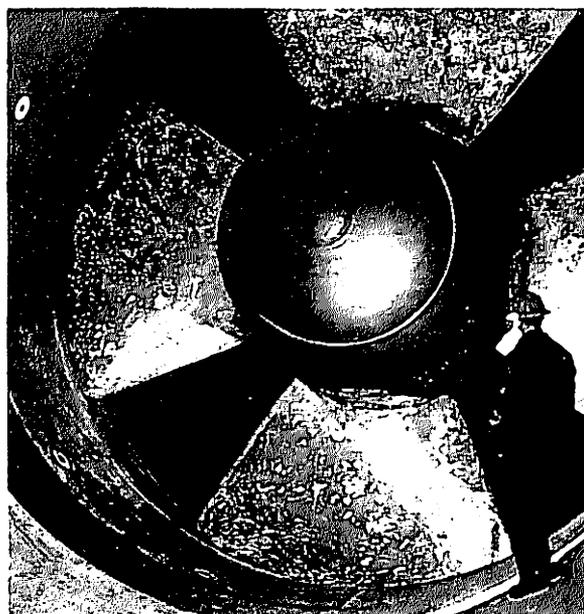
C'est un groupe bulbe (fig. 2.10) dont les performances sont intéressantes pour des chutes de hauteur < 15 m.

Il fonctionne en générateur synchrone triphasé dans les deux sens de rotation. Le groupe bulbe rassemble dans une même enveloppe métallique une turbine Kaplan à écoulement axial horizontal à 4 pales orientables en fonction du débit de l'eau et de son sens d'écoulement. Il fonctionne immergé et les pales de 5,35 m de diamètre sont usinées pour passer à quelques mm des parois du conduit. La puissance unitaire est de 10 000 kW à 94 tr/min. La roue polaire comporte 64 pôles.

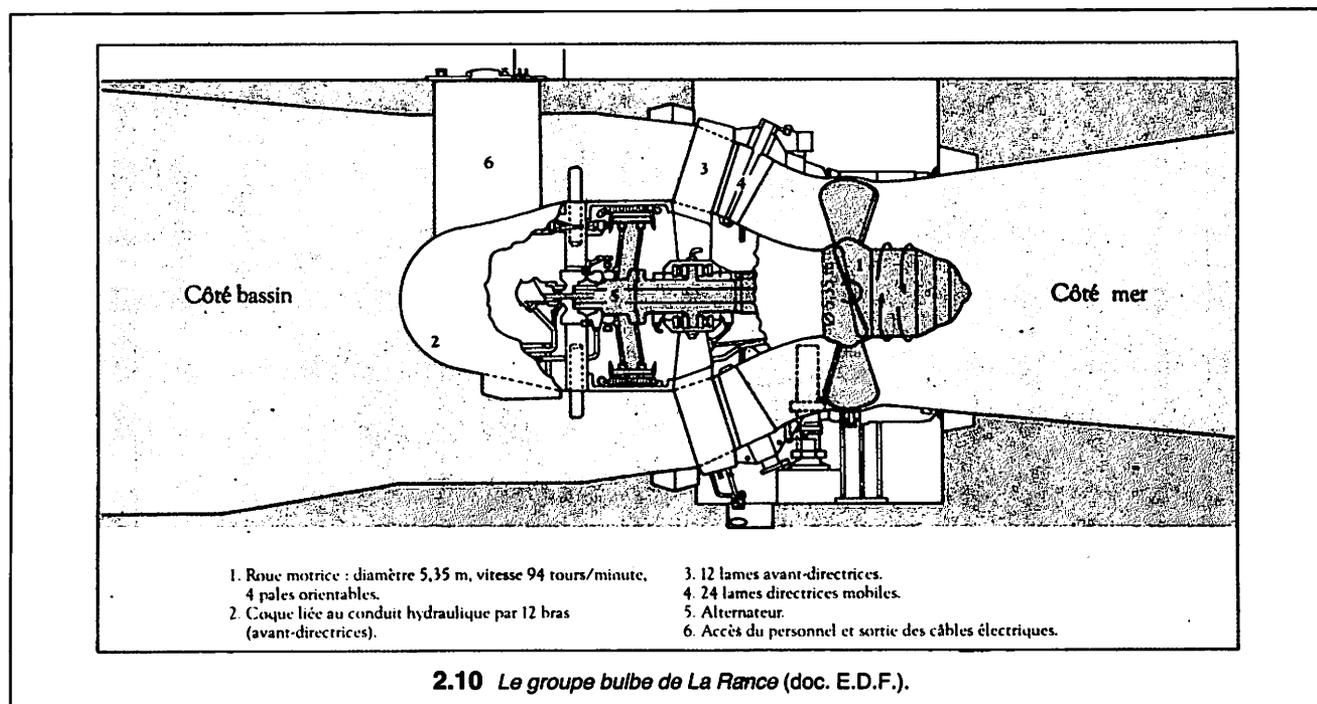
La puissance installée (24 groupes) est de 240 000 kW.

### • Conduite de l'usine

La gestion par ordinateur tient compte de nombreux facteurs : hauteur des marées selon les heures et les saisons, besoins en énergie en fonction des heures de la journée ainsi que de tous les critères économiques conduisant à une meilleure optimisation. A cette effet on pilote ou la production par un nombre approprié de groupes ou l'accumulation d'eau par pompage en amont du barrage.



2.11 Turbine kaplan à axe horizontal (doc. E.D.F.). ▶

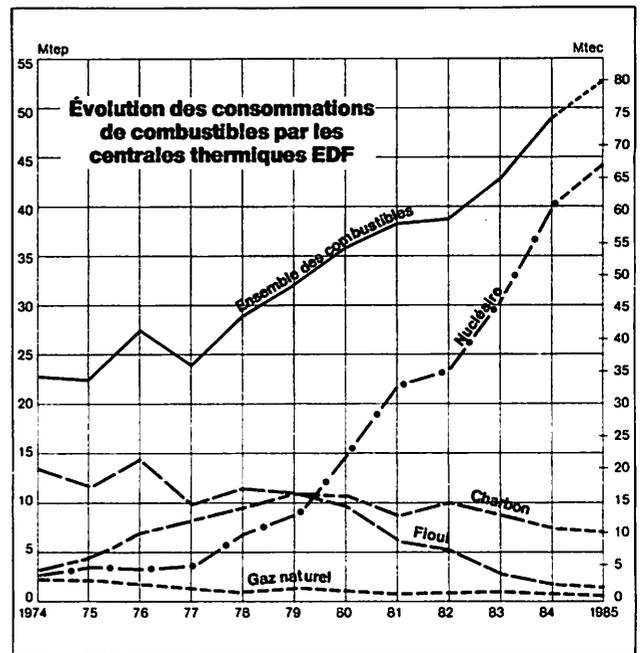


### 3. CENTRALES THERMIQUES A FLAMME

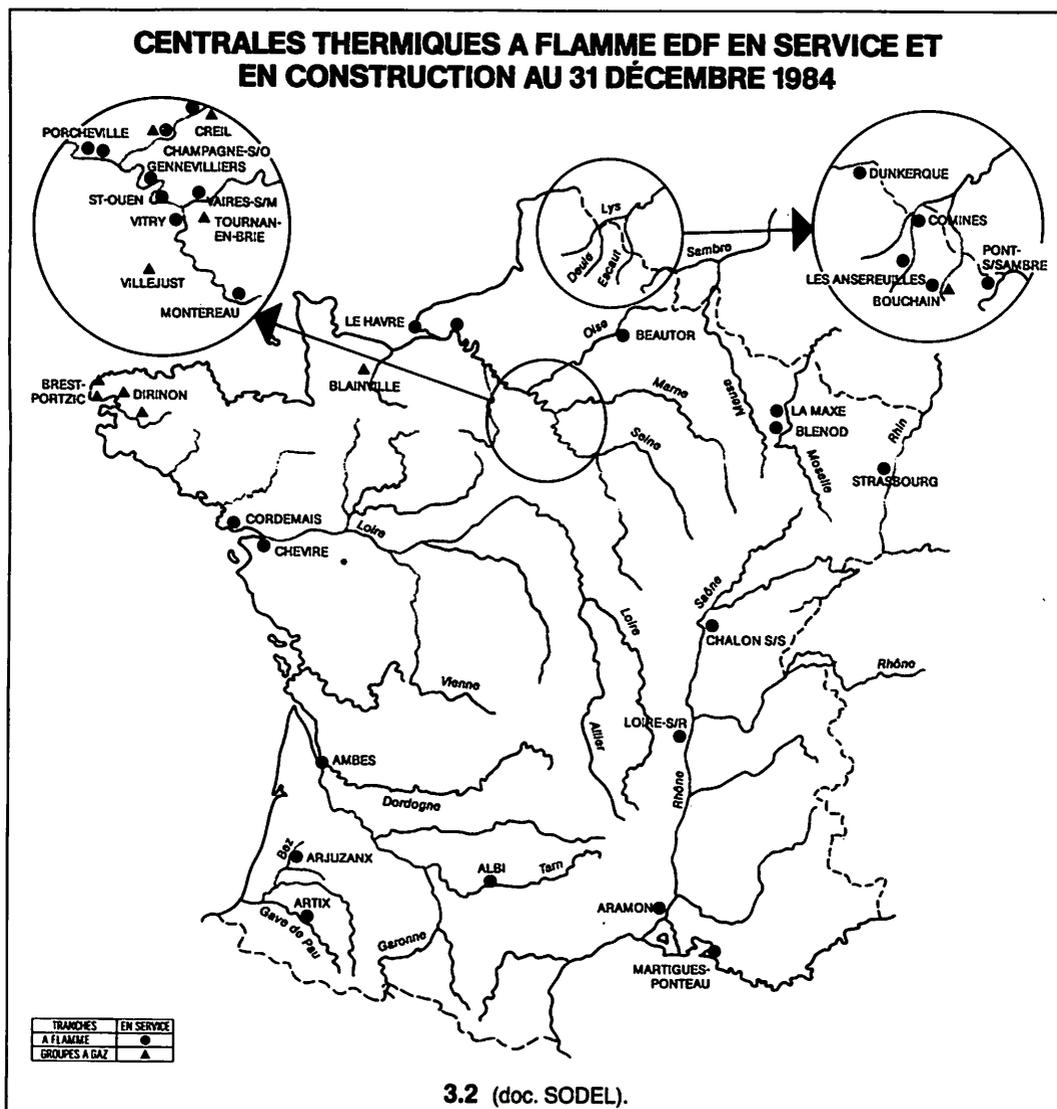
Les centrales thermiques à flamme ont une importance relative dans la production d'énergie électrique thermique. Les courbes d'évolution des consommations de combustibles (charbon et fioul) montrent que leur contribution à la production totale d'énergie électrique est de l'ordre de 10 à 15 % (fig. 3.1). La puissance unitaire des groupes des centrales thermiques (jusqu'à 700 MW) a permis d'atteindre un excellent rendement de l'ordre de 40 % pour les plus modernes et leur viabilité pour ce qui concerne les unités récentes n'est pas remise en cause (fig. 3.2).

#### 1. NOTIONS DE THERMODYNAMIQUE

Le cycle de conversion de la chaleur, dégagée par la combustion, en énergie mécanique passe par la production de vapeur, et par sa détente dans la turbine, laquelle entraîne l'alternateur. Les différents états de l'eau dans ce cycle sont liés à la pression et à la température. La calorimétrie définit la capacité thermique massique des corps, la quantité de chaleur nécessaire pour élever leur température et provoquer leur transformation dans les états solides liquides et gazeux.



3.1



3.2 (doc. SODEL).

$$Q = m c (T_2 - T_1)$$

m	masse en kg
c	capacité thermique massique en Joules par kg et par °K ou °C (0 °C = 273,15 °K) Pour l'eau c = 4,18.10 <sup>3</sup> J/°C
T <sub>2</sub>	température finale
T <sub>1</sub>	température initiale

Trois étapes caractérisent les transformations de l'eau et de la vapeur, de l'arrivée à la chaudière à l'admission à la turbine.

### • 1<sup>re</sup> étape

L'eau est portée de 25 °C environ à 100 °C.  
La relation précédente donne pour 1 dm<sup>3</sup> d'eau (1 kg).  
 $Q_1 = 1\ 000 \times 4,18.10^3 \times (100 - 25) = 313,5\ \text{kJ}$

### • 2<sup>e</sup> étape

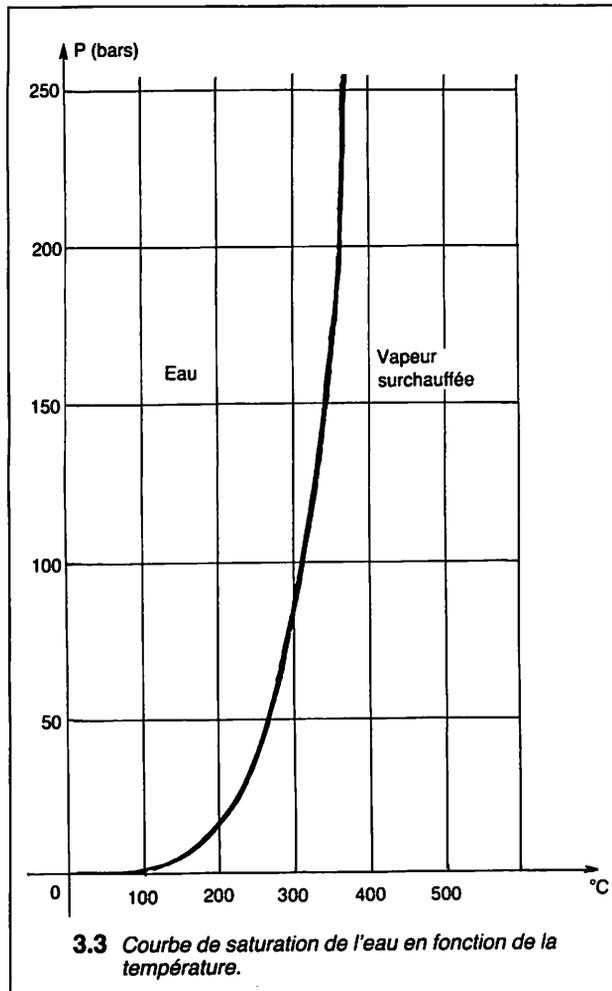
L'eau à 100 °C est vaporisée. La chaleur de vaporisation pour transformer 1 kg d'eau en vapeur saturée à pression constante est 2 244 kJ/kg.  
 $Q_2 = 2\ 244\ \text{kJ}$

### • 3<sup>e</sup> étape

Dans une unité moderne (600 MW) la vapeur est portée à une pression de 165 bars. Les tables de Koch donnent l'enthalpie, c'est-à-dire l'énergie thermique de cette vapeur à une température de 348 °C et à la pression de 165 bars soit 2 562 kJ/kg.

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = 2\ 562\ \text{kJ}$$

La surchauffe porte la température de cette vapeur jusqu'à 565 °C. La constante de Gay Lussac pour la vapeur est  $R = 499\ \text{J/kg/°K}$ . Avec un écart de  $565 - 348 = 217\ \text{°C}$  la quantité de chaleur nécessaire à la surchauffe est  $Q_4 = 499 \times 217 = 1\ 082\ \text{kJ/kg}$ . L'enthalpie totale de la vapeur est donc  $2\ 562 + 1\ 082 = 3\ 644\ \text{kJ/kg}$ .



Le cycle de Carnot donne le rendement théorique d'un système thermodynamique :

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2}$$

Les températures absolues s'expriment en °K  
 $\left\{ \begin{array}{l} T_2 \text{ source chaude} \\ T_1 \text{ source froide} \end{array} \right.$

Dans notre cas  $T_2 = 565 + 273 = 838\ \text{°K}$   
 $T_1 = 25 + 273 = 298\ \text{°K}$

$$\eta = \frac{838 - 298}{838} = 0,64$$

Ce rendement est bien supérieur à celui réellement obtenu. Aux conditions de fonctionnement d'une Centrale de 600 MW : La consommation de vapeur est de 1 600 tonnes/heure, à une température de 565 °C une pression de 165 bars, l'enthalpie de la vapeur est de 3 644 kJ/kg.

L'énergie brute de la vapeur est  $3\ 644 \times 1,6.10^6 = 5,83.10^9\ \text{kJ}$ .

La puissance correspondante  $\frac{5,83.10^9}{3\ 600} = 1\ 620\ 000\ \text{kW}$ .

Les auxiliaires absorbent environ 90 000 kW.

La puissance utilisée par la turbine est 1 530 000 kW.

Avec un rendement de 0,4 elle fournit sur l'arbre 612 000 kW.

L'alternateur, avec un rendement de 0,98 a une puissance de 600 MW.

## 2. CYCLE THERMIQUE DE LA TURBINE A LA VAPEUR

Dans une enceinte fermée (circuit chaudière-turbine) où se trouvent l'eau et la vapeur, la pression de la vapeur correspond à la température, cette température est précisément celle du point d'ébullition de l'eau pour cette pression. Quand la température augmente l'eau se vaporise, de même si la pression est inférieure à la tension de vapeur pour cette température.

Il peut se produire ou une vaporisation ou une condensation de l'eau en fonction des évolutions de la pression et de la température, mais ces phénomènes présentent une certaine inertie.

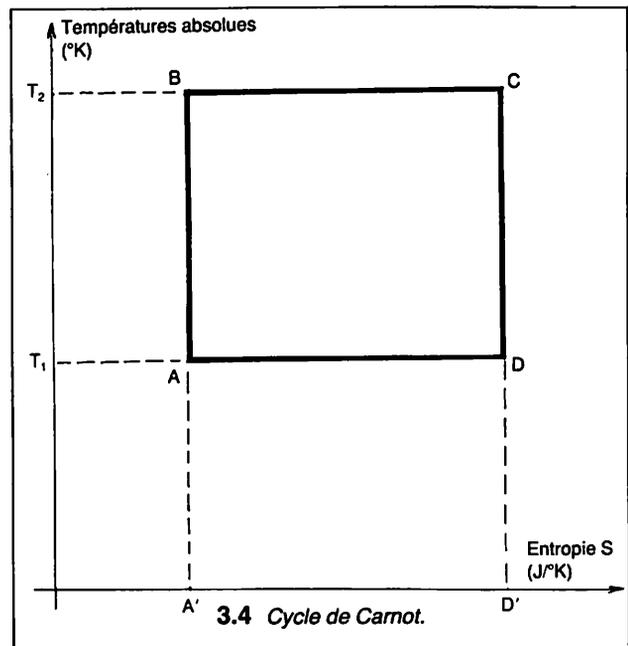
La figure 3.3 donne la courbe de saturation de l'eau ou ligne de démarcation entre l'eau et la vapeur selon la pression en fonction de la température.

L'eau n'existe plus sous forme liquide au-delà de 370 °C, la pression est alors à peu près comprise entre 230 et 250 bars.

• **Le cycle de Carnot** (fig. 3.4) peut être représenté par un rectangle :

Les côtés A D (température  $T_1$ ) et B C (température  $T_2$ ) traduisent 2 transformations isothermes (à température constante).

Les côtés A B et C D sont les deux transformations isentropiques (à entropie constante).



La quantité de chaleur transformée en énergie est proportionnelle au rectangle A B C D. La quantité de chaleur dépensée par la source chaude est proportionnelle au rectangle A' B C D'. Le rapport des deux surfaces donne le rendement.

Comme les rectangles ont même base le rapport des ordonnées donne  $\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2}$ .

Les transformations isentropiques B A et C D sont pratiquement irréalisables en raison de l'inertie des transformations eau-vapeur-eau vues ci-dessus.

De plus le fonctionnement de la turbine en vapeur surchauffée, on dit surchauffe isobare, modifie encore le cycle.

• **Le cycle de Hirn** (fig. 3.5) caractérise ce diagramme entropique.

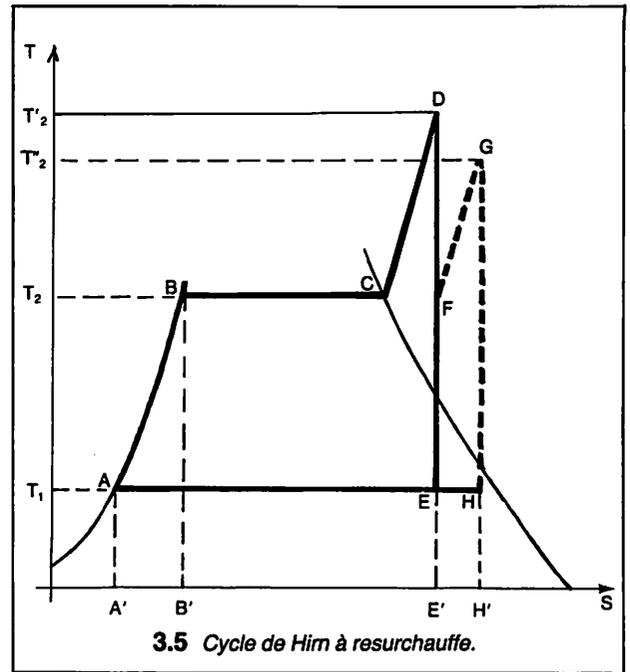
Échauffement de l'eau	: A B de $T_1$ à $T_2$
Évaporation	: B C
Surchauffe à pression constante	: C D
Détente	: D E
Condensation	: E A

Le rapport des aires  $\frac{A B C D E}{A' A B C D E'}$  est inférieur à celui de Carnot

ainsi que le rendement  $\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2'}$ .

Ce cycle est légèrement modifié quand on prévoit une resurchauffe de la vapeur après la détente dans l'étage haute pression de la turbine.

(Cycle A B C D C' D' E' A).



• **La chaudière**

La chaudière est une chambre de combustion dont les parois sont constituées par des faisceaux de tubes dans lesquels circule l'eau. Le combustible est soit du charbon broyé en poussière fine, injecté avec l'air chaud par des brûleurs équipés de souffleries, soit du fioul lourd réchauffé à 110 °C pour accroître sa fluidité et injecté sous pression dans les brûleurs. Les corps de chauffe et surtout les brûleurs sont prévus pour l'un ou l'autre combustible.

Les résidus de combustion notamment ceux du charbon passent par des dépoussiéreurs électrostatiques à haute tension qui retiennent les cendres. Elles sont évacuées après arrosage sous forme de boues liquides.

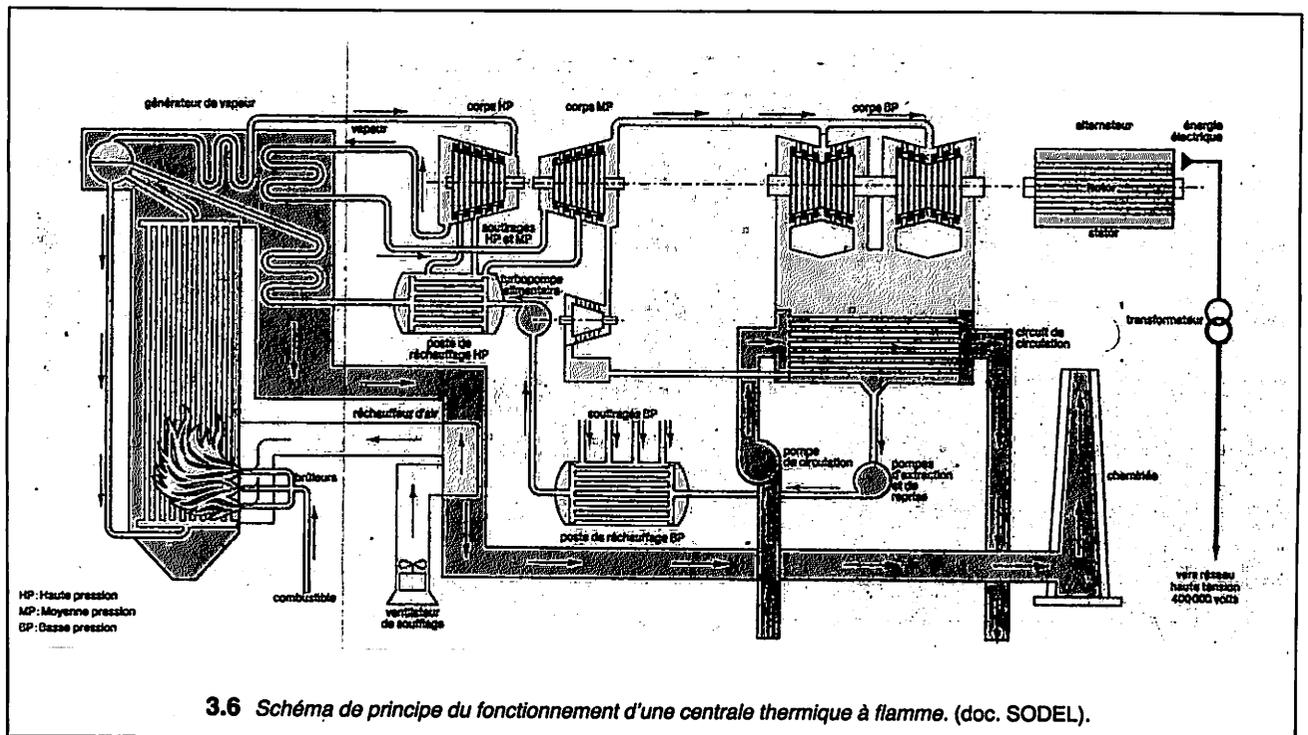
Chaque chaudière a une façade équipée de plusieurs batteries de brûleurs.

La combustion est activée par des ventilateurs de soufflage et par la dépression importante créée par la cheminée de grande hauteur (par exemple 150 m).

### 3. CONSTITUTION D'UNE CENTRALE THERMIQUE

Les éléments essentiels d'une centrale thermique sont (fig. 3.6) :

- La chaudière ou générateur de vapeur.
- La turbine ou moteur du groupe turbo-alternateur.
- Le condenseur.
- La pompe alimentaire.
- Les auxiliaires et machines annexes de chauffage et de pompage.
- L'alternateur et son raccordement au réseau sont étudiés plus loin (en 5, p. 220).



La chaleur dégagée permet également selon le schéma de principe (fig. 3.6) :

- de surchauffer la vapeur au départ ainsi qu'une boucle de resurchauffe entre les corps HP et MP de la turbine ;
- de réchauffer l'air extérieur destiné à la combustion ;
- de réchauffer l'eau revenant du condenseur vers la chaudière.

L'eau chimiquement pure circule en circuit fermé à très haute pression et se transforme en vapeur. Dans les unités récentes la température est de 565 °C et la pression de 165 bars.

### • La turbine

La turbine comprend les corps Haute, Moyenne et Basse pression (fig. 3.7).

Le corps H P a 12 étages.

Le corps M P a 10 étages.

Les 3 corps B P ont chacun 2 fois 7 étages symétriques par rapport au centre où s'effectue l'admission de la vapeur.

A la sortie des corps B P la vapeur est détendue à une pression de l'ordre de 10 bars encore suffisante pour alimenter la turbo-pompe alimentaire et d'autres auxiliaires.

La vitesse de rotation de 3 000 tr/min et le diamètre des ailettes du rotor surtout dans le corps BP (fig. 3.8) donnent des vitesses périphériques élevées (750 m/s). Ces éléments exigent un usinage et un équilibrage irréprochables.

### • Le condenseur

A la sortie du corps B P de la turbine la vapeur détendue est acheminée vers le condenseur. Le condenseur a un corps cylindrique dans lequel sont logés des faisceaux de tubes. La vapeur admise dans le corps du condenseur est refroidie par l'eau qui circule dans les tubes selon le principe des échangeurs.

Cet appareil constitue la source froide du cycle.

L'eau de refroidissement peut avoir deux origines :

A circuit ouvert il s'agit de l'eau d'un fleuve proche prise en amont de l'usine et restituée plus loin. Elle subit plusieurs opérations de décantation et filtrage. Selon la puissance des unités le débit exigé par le refroidissement peut atteindre plusieurs dizaines de m<sup>3</sup>/s.

A circuit fermé, en raison de ces débits importants et de l'élévation de la température de l'eau restitué au fleuve, il s'agit de l'eau qui circule dans les aéroréfrigérants ou tours de réfrigération (voir centrales nucléaires). Les déperditions sont alors réduites à quelques m<sup>3</sup>/heure.

A la sortie du condenseur l'eau provenant de la condensation de la vapeur est acheminée à nouveau vers la chaudière par les pompes d'extraction.

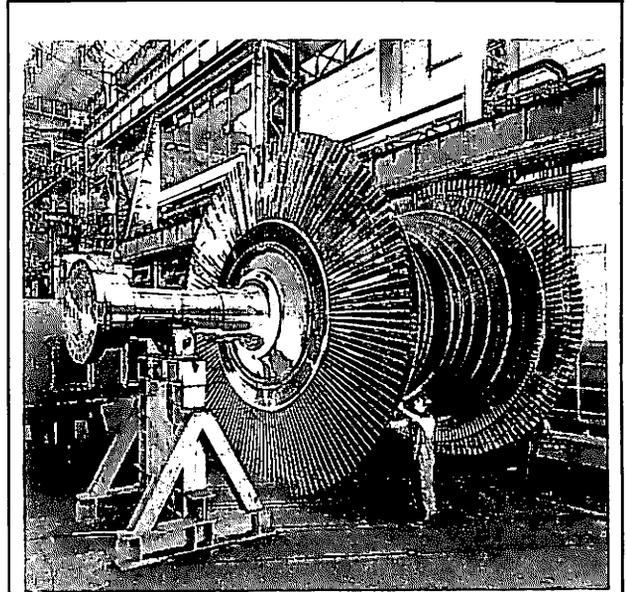
### • La pompe alimentaire

Pratiquement deux groupes de pompes Basse pression et Haute pression prélèvent l'eau extraite du condenseur. Les pompes B P « travaillent » jusqu'à 25 ou 30 bars de pression et les pompes H P jusqu'à 180 bars. Sur ce même circuit des réchauffeurs (par soutirage de vapeur) donnent à l'eau sa température d'admission à la chaudière au voisinage de l'ébullition.

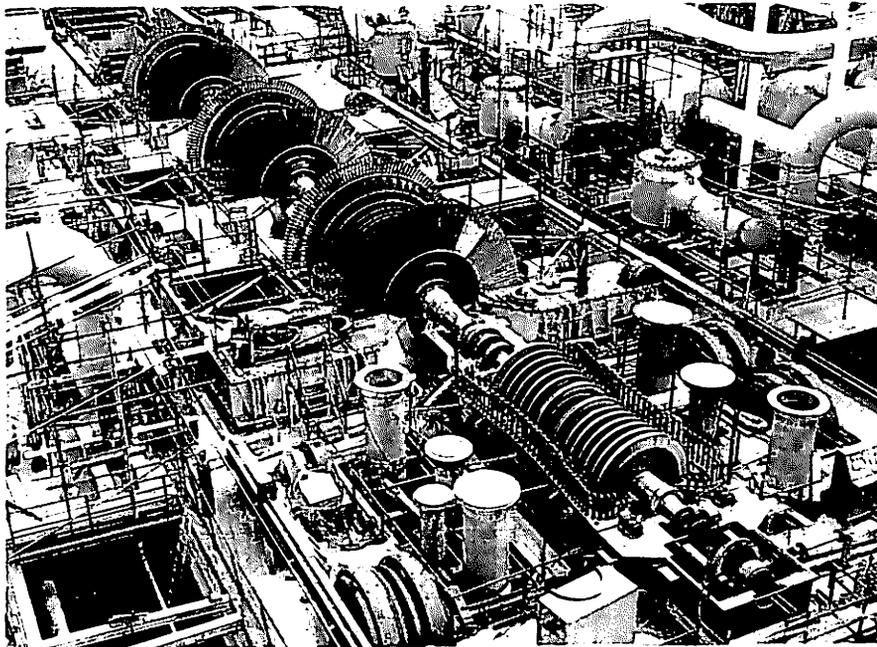
260 °C sous 150 bars de pression.

Les auxiliaires sont nombreux et importants :

- ventilateurs des brûleurs pour l'admission d'air comburant ;
- ventilateurs de tirage de cheminée ;
- groupes électropompes des différents circuits d'eau ;
- dépoussiéreurs électrostatiques de fumées ;
- etc.



3.8 Turbine : rotor du corps basse pression (doc. SODEL).



3.7 Turbine en cours de montage (un corps HP et 3 corps BP) (doc. ALSTHOM).

# 4. CENTRALES ÉLECTRIQUES NUCLÉAIRES

## 1. RAPPELS DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE

### • Constituants des atomes

L'atome est composé d'un certain nombre de particules (fig. 4.1).  
Un atome est défini par sa masse A et sa charge électrique Z.



Exemple : l'atome de carbone

12 ----- 6 protons + 6 neutrons  
C  
6 ----- 6 électrons

L'atome stable est donc un assemblage électriquement neutre où les électrons gravitent autour du noyau à très grande vitesse, à des distances correspondant à leur niveau d'énergie. Les dimensions infinitésimales de ces éléments et les distances qui les séparent expliquent le « vide » de la matière et la densité considérable des noyaux : 100 millions de tonnes par cm<sup>3</sup> !

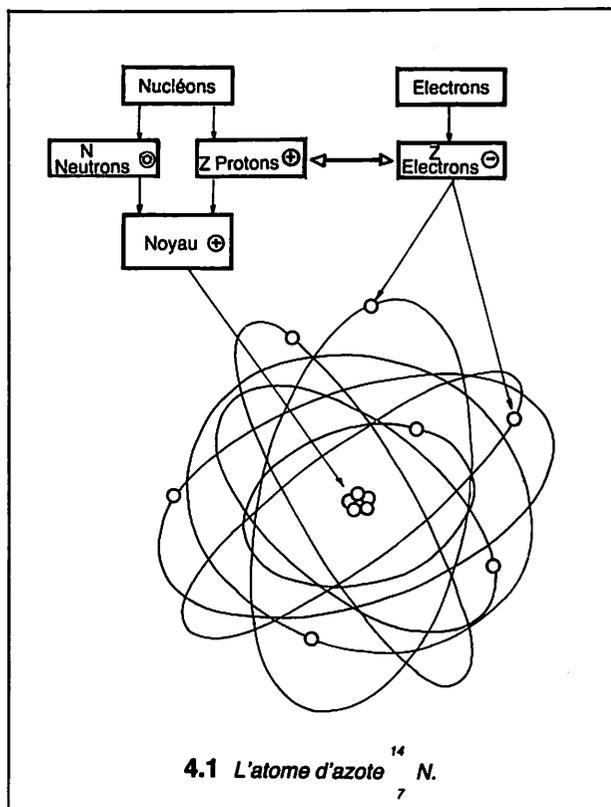
Il existe 300 nucléides naturels – environ 1 200 artificiels.

La mole de carbone est prise comme référence du système des masses atomiques. Sa masse est 12 grammes. Elle contient N<sub>a</sub> atomes. N<sub>a</sub> (constante d'Avogadro) = 6,022045 · 10<sup>23</sup> pour une masse de 12 u.m.a. (12 unités de masse atomique).

On définit ainsi l'unité de masse atomique =

$$1 \text{ u.m.a.} = \frac{1}{6,022045 \cdot 10^{23}} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Le tableau (fig. 4.2) donne la classification des éléments.



### 4.2 Classification périodique des éléments (table Mendeleev).

Les éléments sont classés horizontalement par nombre atomique croissant et verticalement suivant la disposition des électrons autour du noyau. On retrouve, dans la même colonne, des éléments ayant des propriétés chimiques analogues

(ex. : alcalins dans la première colonne, gaz rares dans la dernière colonne).

Les cases grises correspondent aux 90 éléments naturels, les 13 cases rouges aux éléments créés artificiellement.

1	H 1 008 Hydrogène																	2	He 4 003 Hélium																
3	Li 6 940 Lithium	4	Be 9 013 Béryllium															10	Ne 20 183 Néon																
11	Na 22 997 Sodium	12	Mg 24 32 Magnésium															18	Ar 39 944 Argon																
19	K 39 098 Potassium	20	Ca 40 08 Calcium	21	Sc 44 96 Scandium	22	Ti 47 88 Titane	23	V 50 95 Vanadium	24	Cr 52 01 Chrome	25	Mn 54 93 Manganèse	26	Fe 55 85 Fer	27	Co 58 94 Cobalt	28	Ni 58 69 Nickel	29	Cu 63 54 Cuivre	30	Zn 65 38 Zinc	31	Ga 69 72 Gallium	32	Ge 72 60 Germanium	33	As 74 91 Arsenic	34	Se 78 96 Sélénium	35	Br 79 916 Brome	36	Kr 83 80 Krypton
37	Rb 85 48 Rubidium	38	Sr 87 63 Strontium	39	Y 88 92 Yttrium	40	Zr 91 22 Zirconium	41	Nb 92 91 Niobium	42	Mo 95 95 Molybdène	43	Tc 99 Technétium	44	Ru 101 07 Ruthénium	45	Rh 102 91 Rhodium	46	Pd 106 7 Paladium	47	Ag 107 86 Argent	48	Cd 112 41 Cadmium	49	In 114 76 Indium	50	Sn 118 70 Étain	51	Sb 121 76 Antimoine	52	Te 127 61 Tellure	53	I 126 91 Iode	54	Xe 131 3 Xénon
55	Cs 132 91 Césium	56	Ba 137 36 Baryum	57 à 71	72	Hf 178 6 Hafnium	73	Ta 180 95 Tantale	74	W 183 82 Tungstène	75	Re 186 21 Rhenium	76	Os 190 2 Osmium	77	Ir 192 2 Iridium	78	Pt 195 23 Platine	79	Au 197 2 Or	80	Hg 200 61 Mercure	81	Tl 204 39 Thallium	82	Pb 207 21 Plomb	83	Bi 209 9 Bismuth	84	Po (210) Polonium	85	At (211) Astate	86	Rn 222 Radon	
87	Fr (223) Francium	88	Ra (226) Radium	89 à 103																															
Série des lanthanides		57	La 138 92 Lanthane	58	Ce 140 13 Cérium	59	Pr 140 92 Praseodyme	60	Nd 144 27 Néodyme	61	Pm (145) Prométhée	62	Sm 150 43 Samarium	63	Eu 152 Europium	64	Gd 157 9 Gadolinium	65	Tb 158 93 Terbium	66	Dy 162 46 Dysprosium	67	Ho 164 94 Holmium	68	Er 167 2 Erbium	69	Tm 169 4 Thulium	70	Yb 173 04 Ytterbium	71	Lu 174 99 Lutécium				
Série des actinides		89	Ac (227) Actinium	90	Th 232 05 Thorium	91	Pa (231) Protactinium	92	U 238 07 Uranium	93	Np (237) Neptunium	94	Pu (242) Plutonium	95	Am (243) Americium	96	Cm (247) Curium	97	Bk (247) Berkélium	98	Cf (251) Californium	99	Es (252) Einsteinium	100	Fm (257) Fermium	101	Md (288) Mendelevium	102	Nv (293) Nébulium	103	Lr (260) Lawrencium				

**• Relation entre la masse et l'énergie**

C'est la relation d'Einstein.

$$W = m c^2 \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} W \text{ joules} \\ m \text{ masse en kg} \\ c \text{ vitesse de la lumière} \\ 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \end{array}$$

1 g de matière contient  $1 \cdot 10^{-3} \times (3 \cdot 10^8)^2 = 9 \cdot 10^{13}$  joules.  
 L'énergie libérée par un électron dont le potentiel diminue de 1 V est de 1 eV.  
 1 électron volt =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  joule.  
 En physique nucléaire on exprime l'énergie par des multiples :  
 1 MeV =  $10^6$ eV    1 GeV =  $10^9$ eV  
 La conversion de la masse en énergie devient possible à partir des unités ainsi définies pour la matière et l'énergie.  
 1 u.m.a. = 931,5 MeV

Cette équivalence ne doit pas faire illusion, la conversion (au même titre que la conversion énergie chaleur – énergie mécanique) n'est jamais parfaite (fig. 4.3).

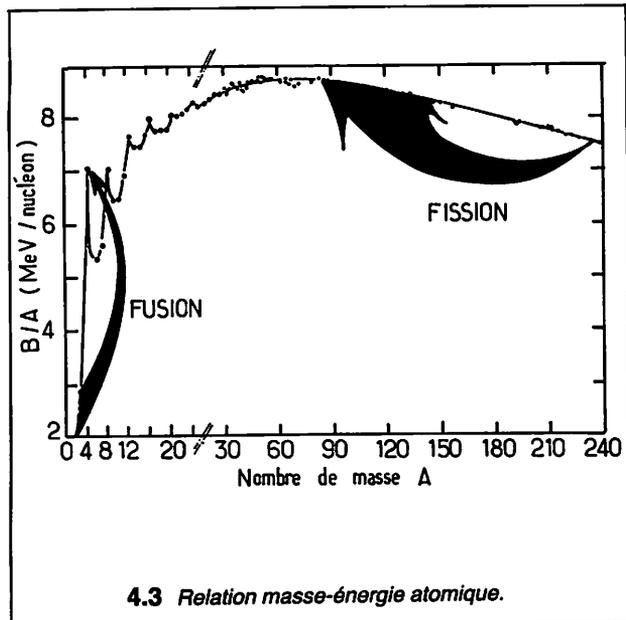
**• Origine de l'énergie nucléaire**

La masse totale d'un noyau est inférieure à celle de ses constituants : le principe de conservation de l'énergie assure sa stabilité. On constate ainsi que le deutérium  ${}^2_1\text{H}$  qui a une masse de 2,014735 u.m.a. est constitué de

- 1 proton 1,007593 u.m.a.
- 1 neutron 1,008982 u.m.a.
- 1 électron 0,000549 u.m.a.

L'écart de 0,002389 u.m.a. ou « perte de masse » représente l'énergie de liaison soit 2,225 MeV, entre les nucléons (protons et neutrons).

Éléments	Proton	Électron	Neutron	Noyau
Dimensions en m	$2 \cdot 10^{-15}$		$2 \cdot 10^{-15}$	$10^{-15}$ à $10^{-14}$
Charge électrique en coulombs	$1,6 \cdot 10^{-19}$	$-1,6 \cdot 10^{-19}$	0	$Z \times 1,6 \cdot 10^{-19}$
Masse en kg	$1,672 \cdot 10^{-27}$	$0,91 \cdot 10^{-30}$	$1,674 \cdot 10^{-27}$	
Masse en u.m.a.	1,007593	0,000549	1,008982	
Énergie en MeV	938,2	0,051	939,5	



Cette énergie peut être libérée par la désintégration du noyau. Pour tous les atomes connus on a mesuré l'énergie de liaison (fig. 4.3) MeV par nucléon en fonction de A. Elle est de l'ordre de 6 à 8 MeV. Les flèches indiquent les possibilités de fusion et de fission des noyaux étudiées plus loin.

**• Radioactivité**

La radioactivité de certains nucléides se traduit par une désintégration ou une émission spontanée des rayonnements. Elle obéit à des lois statistiques et traduit l'évolution d'un système instable vers la stabilité.

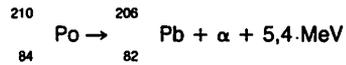
C'est un phénomène exoénergétique.

La désintégration est caractérisée par la disparition d'un noyau et l'apparition d'un autre.

**Désintégration  $\alpha$  :**

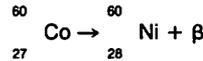
C'est une émission de noyaux d'hélium  $\alpha = {}^4_2\text{He}$

Exemple : le Polonium se désintègre en émettant des particules  $\alpha$



**Désintégration  $\beta$  :** C'est une émission d'électrons  $e \quad \beta = {}^0_{-1}\text{e}$

Exemple : le cobalt radioactif



**Désintégration  $\gamma$  :** C'est un rayonnement de photons sans masse et sans énergie consécutif à l'une des désintégrations précédentes  $\alpha$  ou  $\beta$ .



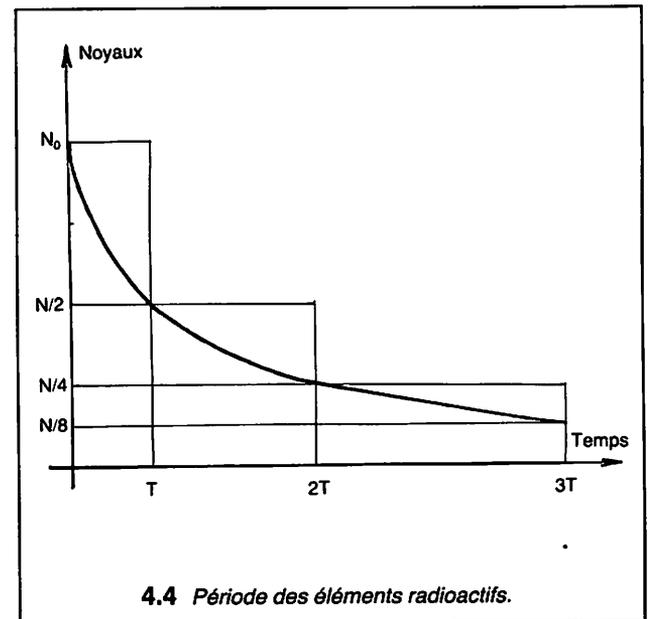
Ces rayonnements sont dits ionisants : ils arrachent des électrons aux atomes qu'ils pénètrent laissant des ions positifs.

Les noyaux radioactifs se désintègrent au cours du temps selon des périodes propres à chaque atome.

Une période T est le temps correspondant à une perte de la moitié du nombre des noyaux initiaux (fig. 4.4).

Exemples :

pour  ${}^{239}_{94}\text{Pu}$  T = 24 000 ans ; pour  ${}^{135}_{54}\text{Xe}$  T = 9,2 heures



La constante radioactive  $\lambda$  caractérise la désintégration d'un élément dans l'unité de temps.

L'activité radioactive B est proportionnelle au nombre de noyaux initiaux N et à la constante radioactive.

$$B = \lambda N \quad B \text{ en becquerel}$$

Le becquerel Bq est l'activité de nucléides radioactifs N telle que le nombre moyen de transitions nucléaires par seconde est égal à l'unité.

La constante radioactive est élevée si la période est faible.

$$\lambda = \frac{0,693}{T} \quad \text{On utilisait aussi le Curie (Ci)} \\ 1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

Le gray Gy est la dose absorbée par une masse de matière de 1 kg à laquelle les rayonnements ionisants communiquent une énergie de 1 joule.

On utilisait le rad (1 Gy = 100 rads).

Le sievert Sv est l'unité d'équivalent de dose absorbée par un récepteur.

Elle tient compte d'un facteur de qualité  $\bar{Q}$  spécifique du rayonnement du récepteur.  $1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy} \times \bar{Q}$

Pour les rayons X  $\bar{Q} = 1$

Pour les neutrons  $\bar{Q} = 10$

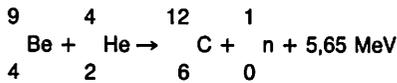
Pour le rayonnement  $\bar{Q} = 20$

On utilisait le Rem (1 Sv = 100 rems)

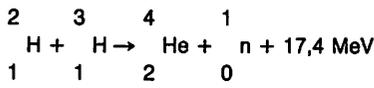
### • Réactions nucléaires provoquées

Ces réactions sont à la base de la production d'énergie nucléaire.

#### • Réaction productrice de neutrons



#### • Réaction de fusion (entre noyaux légers)



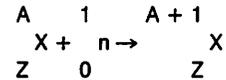
Cette réaction n'est actuellement pas maîtrisée. Elle n'est mise en jeu que dans l'explosion de la bombe H.

## 2. RÉACTION DE FISSION

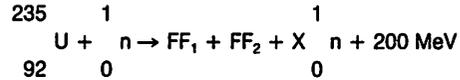
Quand des neutrons (particules sans charge électrostatique) sont projetés vers des noyaux, plusieurs cas sont à envisager :

- Le neutron peut passer à côté du noyau.
- le neutron heurte le noyau. Il peut rebondir ou se ralentir suivant la masse du noyau. Il peut céder de l'énergie que le noyau libérera sous forme  $\gamma$ .

- Le neutron peut être capturé sous certaines conditions de vitesse ou d'agitation thermique.



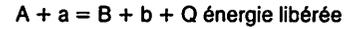
Ce dernier noyau formé peut être stable (émission  $\gamma$ ) ou se désintégrer.



C'est la réaction de fission (fig. 4.5) (FF<sub>1</sub> et FF<sub>2</sub> sont les fragments de fission).

### 1° LA FISSION

C'est la réaction utilisée dans les réacteurs nucléaires classiques. La forme générale d'une réaction nucléaire est :

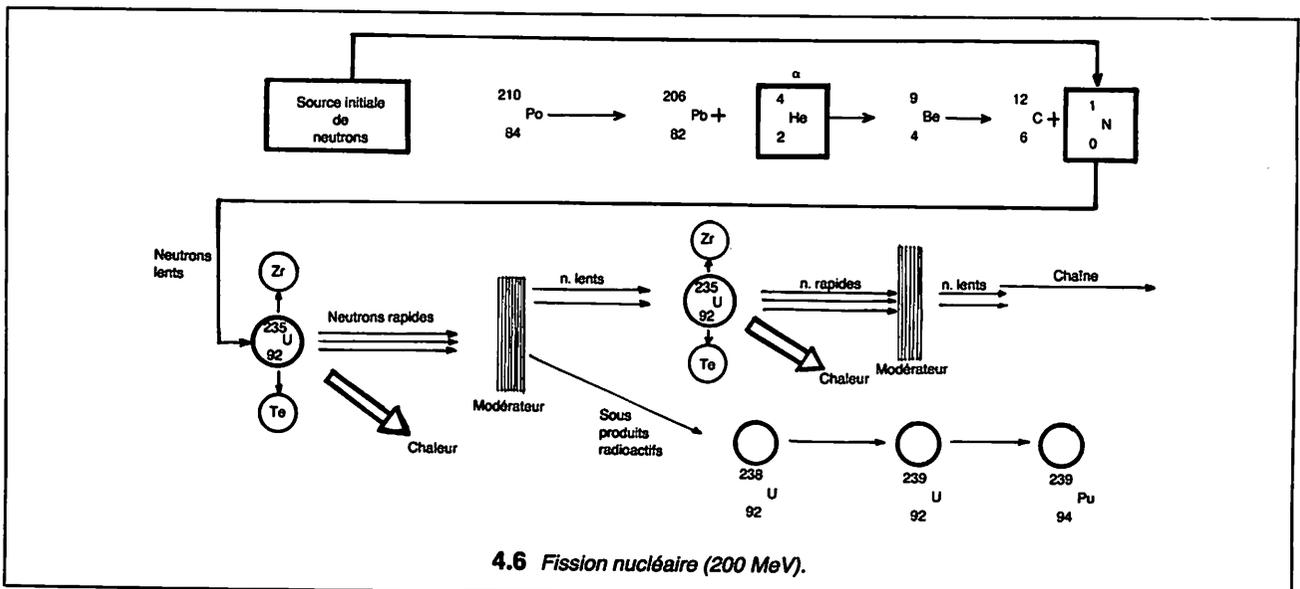
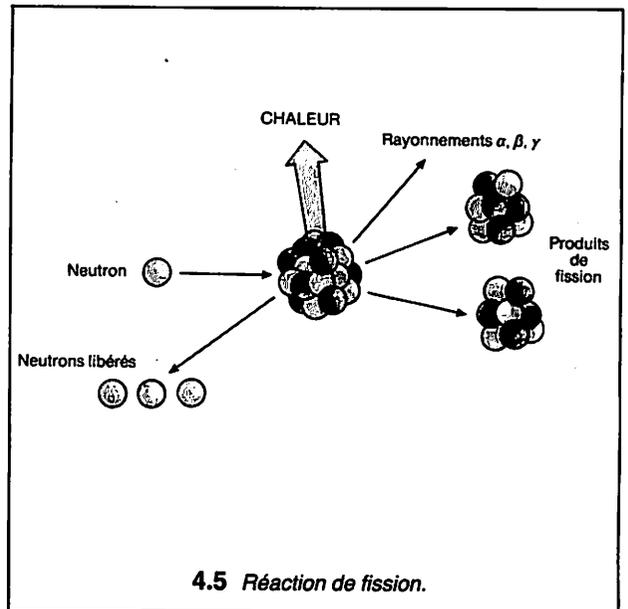


cible + projectile = noyau résiduel + particule sortante observée

Amorçage. Une source radioactive naturelle de Po se désintègre avec rayonnement  $\alpha$  qui au contact du béryllium libère des neutrons.

Cette source de neutrons est approchée du cœur du réacteur puis éloignée quand la réaction est amorcée.

Réaction. La réaction en chaîne peut se représenter ainsi (fig. 4.7).



## • Conditions de la fission

Le noyau peut se représenter comme un goutte d'eau. L'excitation du noyau se traduit par des distorsions de surface (fig. 4.7).

Les forces de tension superficielle tendent à lui redonner sa forme initiale, tandis que les forces de répulsion électrostatiques augmentent cette distorsion. L'énergie des forces de tension superficielle est proportionnelle à la surface. L'énergie des forces électrostatiques croît à densité constante.

Le rapport entre ces deux énergies conditionne le processus de fission.

On démontre que le paramètre de fissibilité est proportionnel à  $\frac{Z^2}{A}$  et que ce rapport augmente avec les noyaux lourds.

## • La réaction en chaîne

Au cours de la fission les neutrons produits s'échappent du barreau de combustible, entrent dans le modérateur et sont ralentis jusqu'au niveau thermique. Ils diffusent à nouveau vers le barreau d'uranium et ils peuvent produire une nouvelle fission.

L'évolution de la population neutronique en réactivité constante est

$$N(t) = N_0 e^{\frac{\varphi}{\Theta} t} \quad \text{dans laquelle :}$$

- $N_0$  est la population neutronique à l'instant 0
- $N$  est la population neutronique à l'instant  $t$
- $e$  valeur de l'exponentielle
- $\varphi$  réactivité =  $k - 1$
- $\Theta$  temps de génération (environ 0,1 s).

Pour que la réaction en chaîne puisse se maintenir il faut que le nombre de neutrons de la  $(m+1)^{\text{ème}}$  génération soit au moins égale au nombre de neutrons de la génération précédente.

On définit un facteur :

$$k_{\text{eff}} = \frac{\text{Nombre de N (m+1)^{ème} génération}}{\text{Nombre de N m^{ème} génération}}$$

$k_{\text{eff}}$  dépend de la structure du cœur, de ses dimensions et du matériau fissible. Il existe une taille pour laquelle  $k_{\text{eff}} = 1$ .

En matériau homogène on calcule  $R_c$  minimum, le rayon critique compatible avec l'entretien de la réaction en chaîne.

Pour  $U_{235}$  pur  $R_c \approx 3,5$  cm.

## 2° PÉRIODE D'UN RÉACTEUR = RÉACTIVITÉ

$k_{\text{eff}}$  définit le régime du réacteur.

Si  $k_{\text{eff}} = 1$  le réacteur est en régime critique.

$k_{\text{eff}} < 1$  le réacteur est en régime sous critique ou convergent

$k_{\text{eff}} > 1$  le réacteur est en régime surcritique ou divergent.

La période du réacteur est l'intervalle de temps au bout duquel le nombre de neutrons présents dans le réacteur (et donc sa puissance) a été multipliée ou divisée par  $e$ . (Base du Log népérien.)

## 3° ÉLÉMENTS FISSILES – ÉLÉMENTS FERTILES

Les isotopes fissiles sont susceptibles de subir la fission sous l'effet des neutrons thermiques (qui ont une énergie suffisante) :

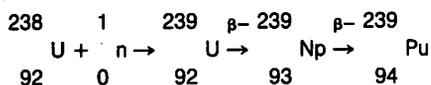
$U_{233}$   $U_{235}$   $Pu_{239}$   $Pu_{241}$ .

Le seul disponible à l'état naturel est  $U_{235}$  mélangé à  $U_{238}$ .

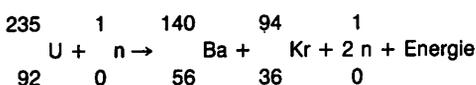
(0,7 % de  $U_{235}$  pour 99,3 % de  $U_{238}$ ).

Les isotopes fertiles peuvent devenir fissiles après capture neutronique et rayonnement  $\beta$  et  $\gamma$ .

Par exemple :



La fission libère de l'énergie, des neutrons et des fragments de fission.



Cette énergie est environ de 200 MeV.

$3 \cdot 10^{10}$  fissions par seconde dégagent une puissance thermique de 1 watt.

Les fragments ou sous produits de la fission, l'un dont le nombre de masse est proche de 140, l'autre de 95 sont radioactifs et se

transforment en environ 200 produits avec émission  $\beta$  et  $\gamma$  et en libérant 80 % environ de l'énergie de fission sous forme de chaleur.

Chaque fission libère des neutrons (1 000 fissions de  $U_{235}$  libèrent 2 500 neutrons). Les neutrons les plus rapides dotés d'une énergie de 1 à 2 MeV (20 000 km/s) peuvent donner de nouvelles fissions : c'est la réaction en chaîne.

Les interactions vues ci-dessus sont régies par des lois statistiques de probabilité.

Le bombardement neutronique devient efficace s'il y a capture et fission.

On définit une section efficace, variable selon les noyaux et l'énergie des neutrons, qui caractérise les surfaces optimales de capture des neutrons.

Ces probabilités d'interaction sont naturellement proportionnelles au nombre de noyaux du milieu considéré  $N$ , déterminant la section efficace.

Comme  $N = 10^{24}$  noyaux par  $\text{cm}^3$  l'unité de section efficace est le **barn**.

$$1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$$

Pour un réacteur du type P.W.R. étudié plus loin, cette section efficace  $\Sigma_f = 0,033 \text{ cm}^{-1}$ .

L'énergie dégagée est de la forme

$$W = W_c \cdot e^{\frac{t}{\Theta}}$$

La réactivité se mesure en p.c.m. (partie pour cent mille).

Si  $k_{\text{eff}} = 1,0004$  la réactivité est de 40 p.c.m.

Les valeurs classiques sont de l'ordre de  $\pm 100$  p.c.m. en marche normale.

Par exemple avec une réactivité de 40 p.c.m. l'énergie fournie par 235<sub>u</sub> est

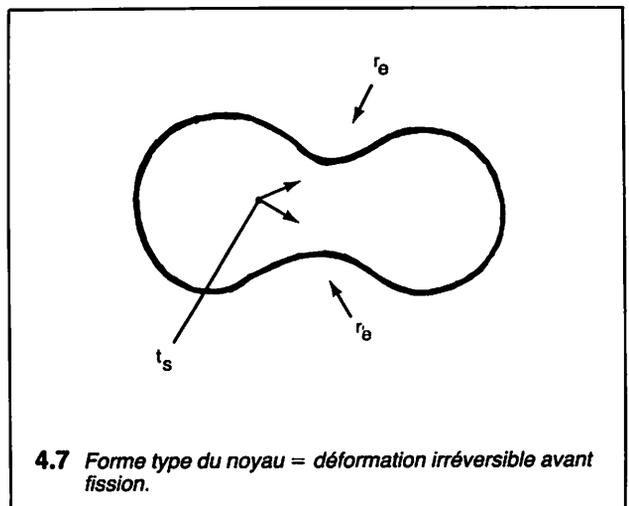
$$W = 3,2 \cdot 10^{-11} \cdot e^{4000t} \text{ joules}$$

C'est une situation rapidement explosive.

Le réglage de la réactivité et de la marche contrôlée du réacteur ne peut se faire en agissant uniquement sur la période. La solution réside dans la présence de neutrons retardés dont le temps d'émission est beaucoup plus long que celui des neutrons prompts. Ils sont émis postérieurement à la suite d'une désintégration. La génération de neutrons prompts et retardés associés donne une période 100 fois plus longue. Par exemple  $T = 250$  s.

Ce qui permet aux dispositifs de contrôle de fonctionner en toute sécurité. Ce contrôle s'exerce par l'introduction des « barres de commande » qui sont des crayons de matériaux neutrophages (carbure de bore, Ag, In, Cd) disposés en grappes et par l'acide borique dissous dans le modérateur qui est aussi un absorbeur de neutrons. Par circulation le modérateur élimine les « points chauds » au niveau des grappes de commande.

De la position des barres et du niveau de concentration du bore dépend la réactivité totale du cœur : de la puissance nominale jusqu'à l'arrêt complet. Il faut noter cependant qu'à l'arrêt, le réacteur dégage une énergie due à la stabilisation des masses dans la chaîne de désintégration (environ 15 MW dans un PWR de 2 700 MW thermiques).



4.7 Forme type du noyau = déformation irréversible avant fission.

#### 4° FILIÈRES DE FISSION

Une filière représente des éléments associés dans une unité de production d'énergie nucléaire. Elle est caractérisée par le combustible, le modérateur et le fluide caloporteur.

La filière la plus développée est la PWR (pressurized water reactor) ou réacteur à eau pressurisée.

Le combustible est  $U_{235}$  en pastilles d'oxyde d'uranium faiblement enrichi (2 à 3 %). L'eau sert à la fois de modérateur et de fluide caloporteur. La filière dite des surrégénérateurs à neutrons rapides utilise de l'oxyde de plutonium et de l'uranium très enrichi.

Il n'y a pas de modérateur et le fluide caloporteur est du sodium. Cette filière est étudiée plus loin.

### 3. TECHNOLOGIE DE L'URANIUM (fig. 4.9)

L'uranium naturel  $U_{238}$  subit de nombreuses opérations de préparation avant son utilisation comme combustible dans le réacteur.

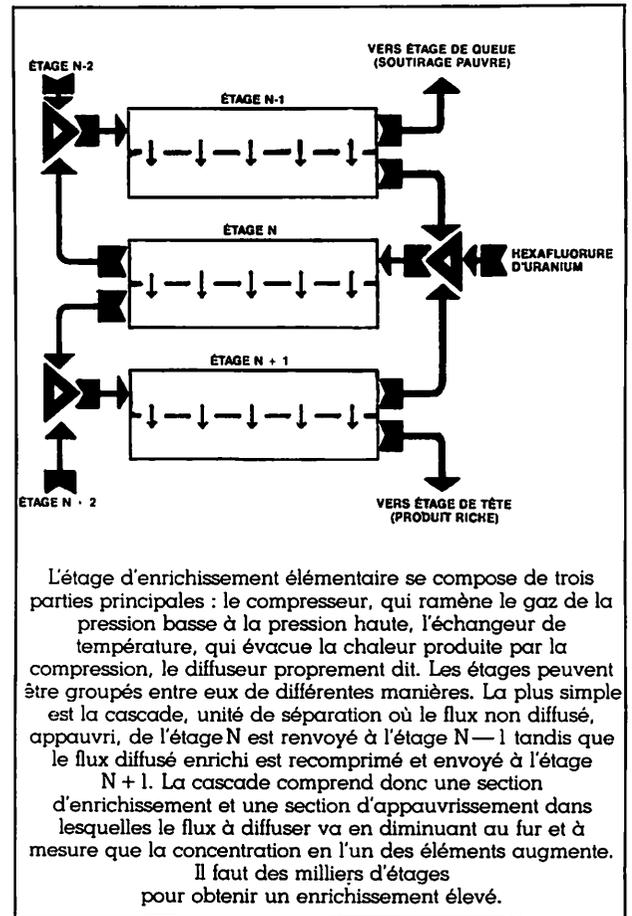
Dans l'ordre : concentration sous forme de diuranate d'ammonium et fabrication du lingot.

Le matériau fertile est ensuite enrichi en  $U_{235}$  à 2 ou 3 % par séparation isotopique à l'aide d'une cascade de filtres ou barrières poreuses qui laissent passer le 235 avant le 238.

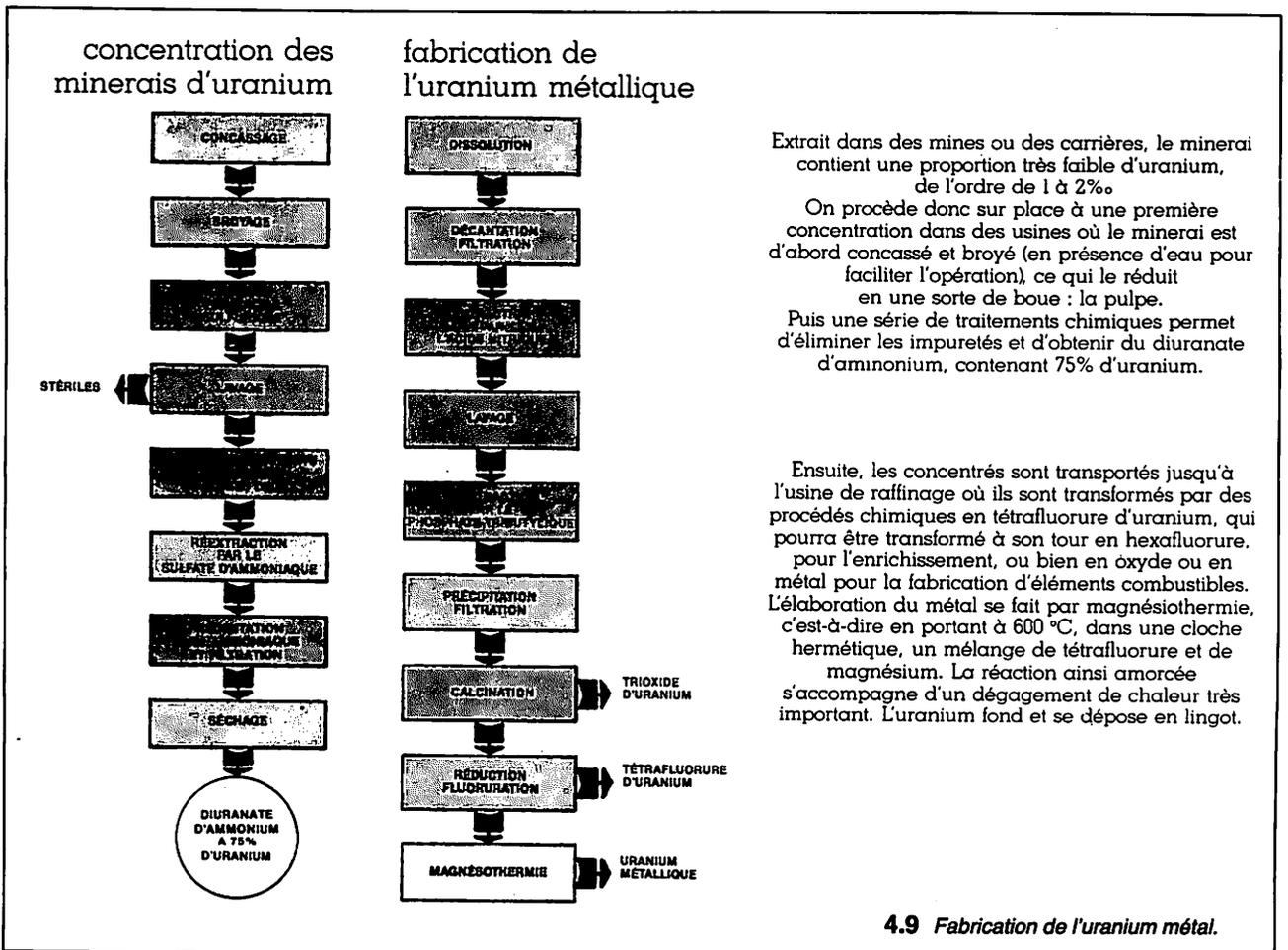
C'est sous forme d'hexafluorure gazeux que les compresseurs acheminent ce gaz et l'oblige à traverser les barrières poreuses (fig. 4.10).

Pour l'uranium 235 destiné aux applications militaires, il faut disposer ainsi des milliers d'étages successifs de compresseurs.

Une usine d'enrichissement exige la production totale d'une centrale de 600 à 900 MW !



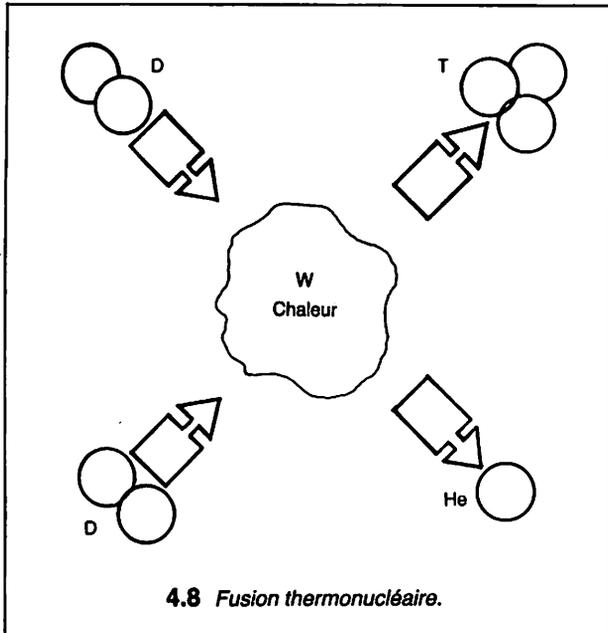
#### 4.10 Enrichissement de l'uranium en isotope 235.▶



#### 4.9 Fabrication de l'uranium métal.

#### 4. LA FUSION THERMONUCLÉAIRE (fig. 4.11)

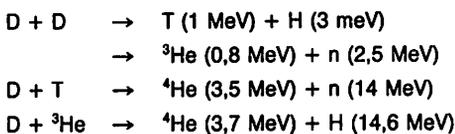
La fusion contrôlée représente une source d'énergie quasi inépuisable à partir des deux isotopes combustibles : le deutérium  $^2\text{H}$  et le lithium  $^7\text{Li}$  dont les réserves sont considérables.



##### 1° ASPECTS THÉORIQUES DE LA FUSION

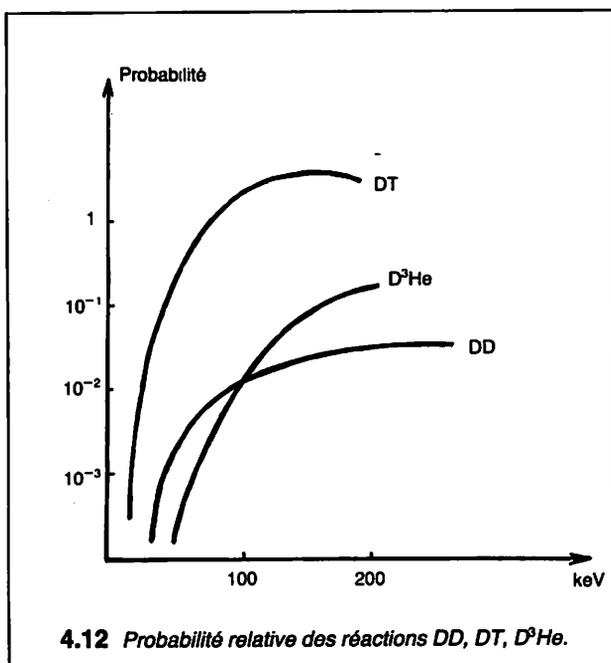
La figure 4.3 montre que les réactions de fusion les plus exoénergétiques font appel aux noyaux très légers.

Les réactions les plus importantes sont les suivantes :



Les énergies entre parenthèses sont emportées.

D = deutérium  
T = tritium  
He = hélium



Dans la 3<sup>e</sup> réaction, on va utiliser cette énergie pour régénérer le tritium.



Cette réaction est exoénergétique.

Dans quelles conditions ces réactions peuvent avoir lieu ?

La probabilité réside dans la section efficace des noyaux (cible) et dans l'énergie des neutrons (projectiles) (fig. 4.12).

Les répulsions coulombiennes des neutrons dans le plasma chaud sont considérables (plusieurs MeV), par contre leur énergie cinétique est faible  $W_c = k T$  environ  $8,62 \cdot 10^{-8} T^{\text{K}}$  keV.

Donc même avec 100 millions de degrés ( $10^8 \text{ T}$ )  $W_c$  est de l'ordre de 8,62 keV.

On définit un critère de Lawson pour atteindre les conditions de réaction.

$$n \tau > 10^{15} \text{ particules/cm}^3 \cdot \text{s} \quad n \text{ particules/cm}^3 \\ \tau \text{ temps de confinement en s.}$$

Le plasma doit être suffisamment chaud, dense et pendant un temps assez long. La filière lente consiste à confiner le plasma de 100 à  $200 \cdot 10^8$  degrés K dans une « enceinte magnétique » ou champ magnétique intense pendant  $10^{-2}$  à 10 s.

La filière rapide consiste à comprimer de petites cibles (quelques mm) de D et T à l'aide de faisceaux très convergents (lasers). On obtient ainsi une puissance de  $10^{15} \text{ W}$  pendant  $10^{-9}$  s.

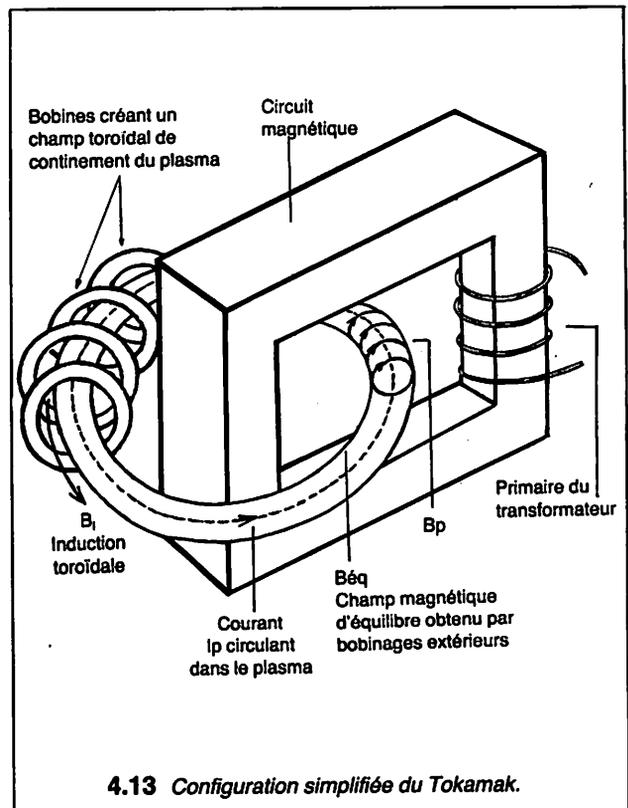
Il faudrait des densités égales à 1000 fois celles des solides pour que le temps de réaction soit réduit à  $10^{-11}$  s.

##### 2° FILIÈRE LENTE – PROJET TOKAMAK

Les éléments de fusion sont confinés dans un tore immatériel, dans une chambre à vide (fig. 4.13). Les particules ont des trajectoires hélicoïdales dans ce tore.

Pour les maintenir dans ce volume toroïdal, deux champs magnétiques sont superposés :

- Un champ provenant des bobines  $B_t$  ayant pour axe le cercle torique. Ces bobines sont réparties sur tout le cercle.
- Un champ  $B_p$  induit par le courant  $I_p$  qui circule dans le plasma. Celui-ci constituant une boucle en court-circuit (enroulement secondaire de transformateur). Ce champ  $B_p$  a tendance à augmenter son rayon selon la loi du flux maximum. On dispose à l'extérieur de la chambre à vide de bobines d'équilibre qui créent un champ  $B_{eq}$  destiné à l'équilibrer.



• **Caractéristiques du J E T  
(Jet européen torus)** (fig. 4.14)

$I_p$  = 3 000 kA  
 $R$  = Grand rayon du tore 2,96 m  
 $B_T$  = 0,3 T  
 $T_{keV}$  = 3  
 $n \tau \approx 10^{13}$  particules  $cm^3/s$

• **Chauffage du plasma**

Le courant  $I_p$  par effet Joule porte le plasma à  $10^6$ ,  $10^7$  degrés C, mais c'est insuffisant. On injecte des particules neutres (H, D, T) à haute énergie (100 keV) ou on réduit le volume du tore (compression adiabatique) en agissant sur  $B_{eq}$ . Le grand rayon peut être réduit de moitié, ce qui contribue à un chauffage plus rapide. Les expérimentations en cours ne peuvent laisser présager un passage au stade industriel avant deux ou trois décades.

3° FILIÈRE RAPIDE A CONFINEMENT INERTIEL

• **Principe**

Le deutérium solide a une densité de  $4,5 \cdot 10^{28}$  particules par  $m^3$ . Avec cette densité le produit  $n \tau$  n'est optimal qu'avec  $\tau = 2$  ns (nanosecondes).

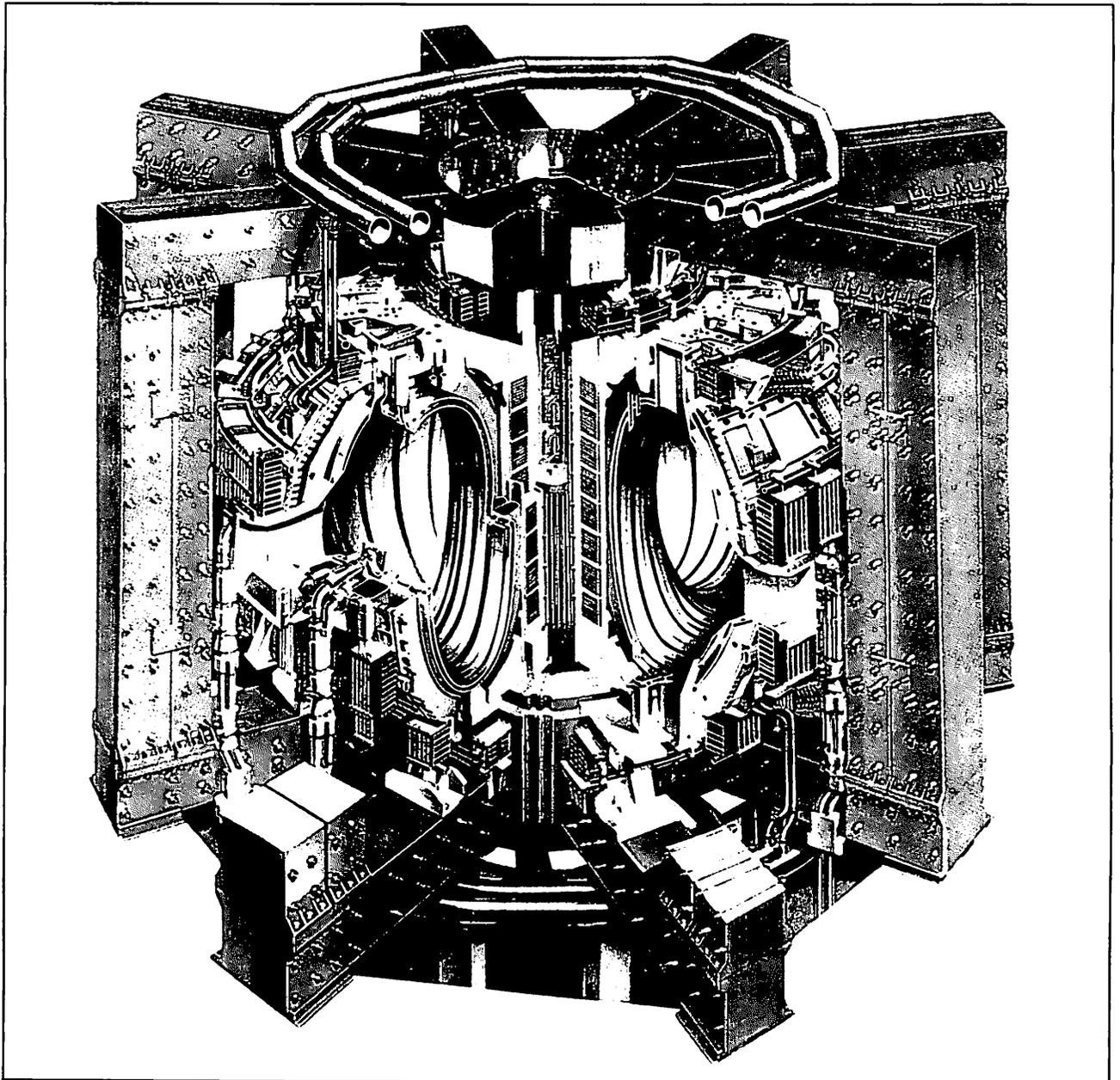
Avec une énergie de 10 keV l'onde de détente parcourt 2 mm en 2 ns. Le rayon minimal de la pastille de D sera donc de 2 mm. Le chauffage exigé en fonction des dimensions requises est de l'ordre de 10 à 100 kJ en 10 ns soit une puissance de  $10^{16}$  watts. Cette puissance considérable est obtenue dans une bombe thermonucléaire par une des réactions de fission. Les gros lasers actuels atteignent actuellement  $10^{15}$  watts.

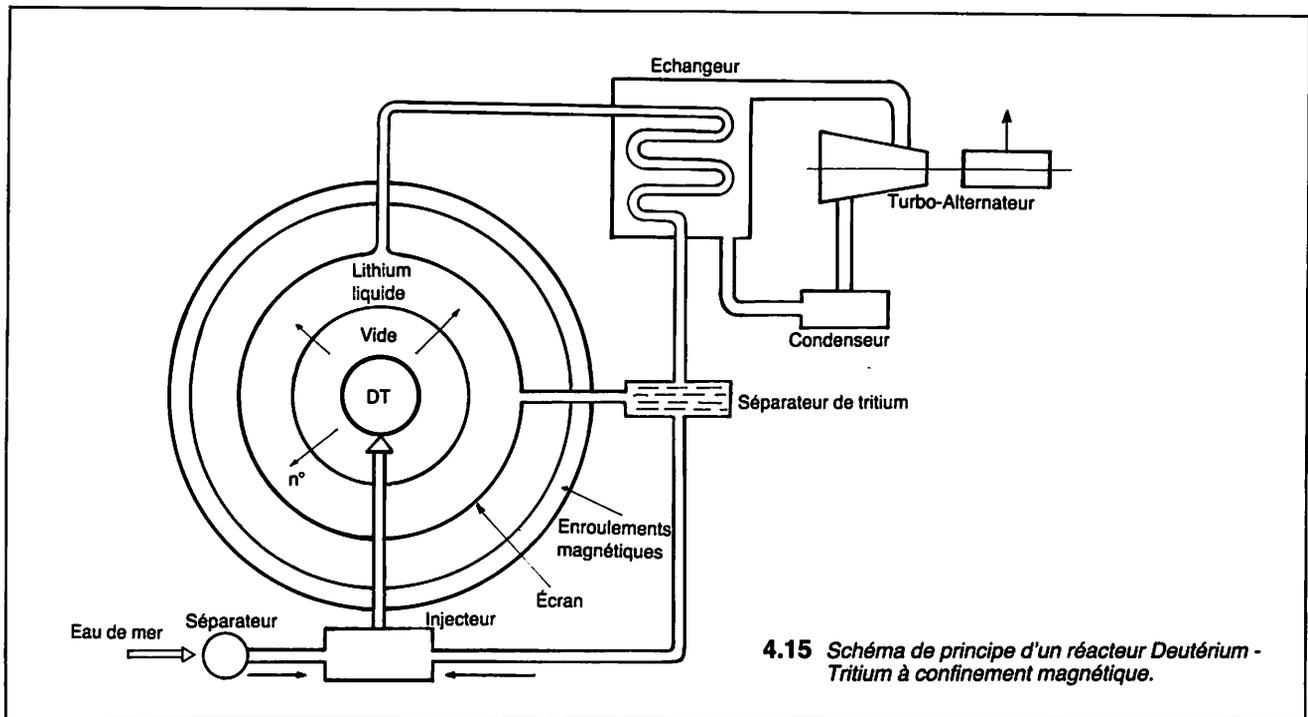
• **Fusion par laser**

Le faisceau soumettrait le milieu à une très forte pression qui par stades successifs déterminerait une implosion de la microsphère D, T.

La densité est alors multipliée par  $10^4$ , la température monte à 10 keV mais le temps imparti 0,1 ns n'est pas encore obtenu.

4.14 *Vue éclatée du Jet (Joint European Torus) installé en Angleterre - Projet Tokamak des Européens (doc. JET). ▼*





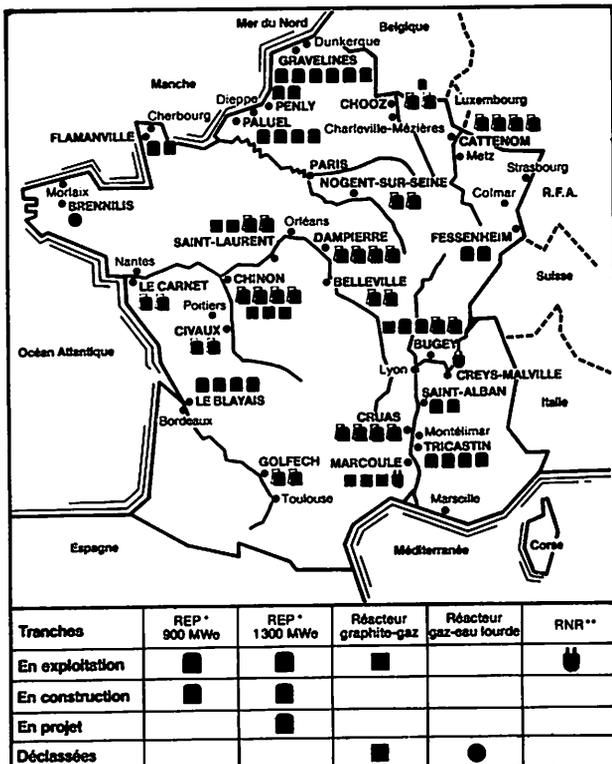
4.15 Schéma de principe d'un réacteur Deutérium-Tritium à confinement magnétique.

• **Étape industrielle**

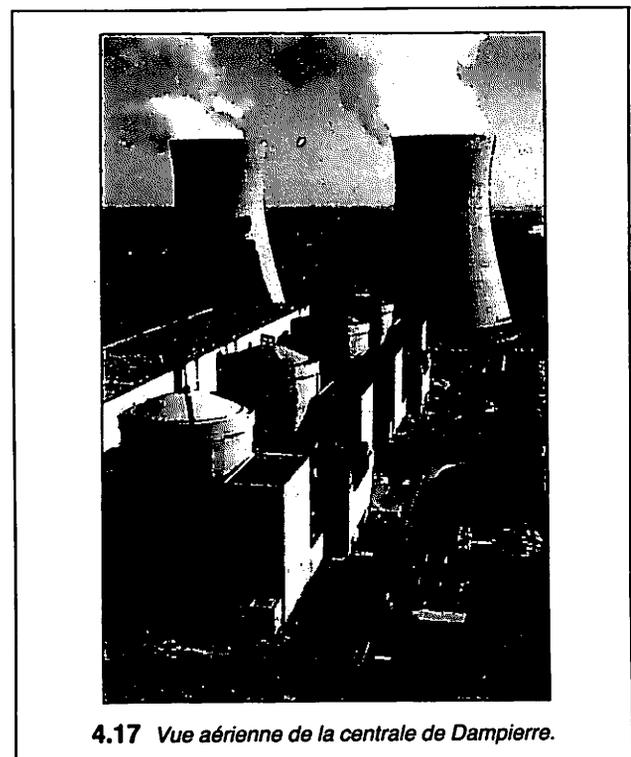
Les problèmes à résoudre sont considérables : Les premiers réacteurs fonctionneront au tritium, mais il faudra le produire à partir du lithium. La récupération de l'énergie par le lithium liquide à 180 °C (plusieurs m<sup>3</sup>) la protection contre les neutrons non absorbés, (au moins 1 m de plomb) les rayonnements  $\gamma$ , la nature du matériau d'enceinte, les bobines à supraconducteurs donnant un champ de 10 Teslas, l'injection des particules, sont autant de difficultés technologiques à surmonter (fig. 4.15).

**5. CENTRALE NUCLÉAIRE**

Unités de 900 MW électriques. Filière R E P (P W R). La carte de France (fig. 4.16) donne l'implantation des sites nucléaires français. Une centrale regroupe plusieurs unités de 900 ou de 1 300 MW. Sur un même site et une même surface la puissance installée en 1954 était de 2 x 125 MW, elle est aujourd'hui à Paluel de 4 x 1 300 MW soit vingt fois plus grande. L'implantation de telles centrales pose un problème essentiellement lié au refroidissement de l'eau des condenseurs, les fleuves étant généralement de débits insuffisants. La solution consiste à construire des tours de réfrigération de dimensions imposantes (150 à 180 m de hauteur) (fig. 4.17).



4.16 Les sites nucléaires français.



4.17 Vue aérienne de la centrale de Dampierre.

Les éléments constitutifs d'une telle unité peuvent se résumer ainsi (fig. 4.18) :

- Réacteur nucléaire (chaudière).
- Circuit d'eau primaire.
- Circuit secondaire de vapeur - turbine - condenseur.
- Alternateur - Transformateur - Ligne très haute tension.

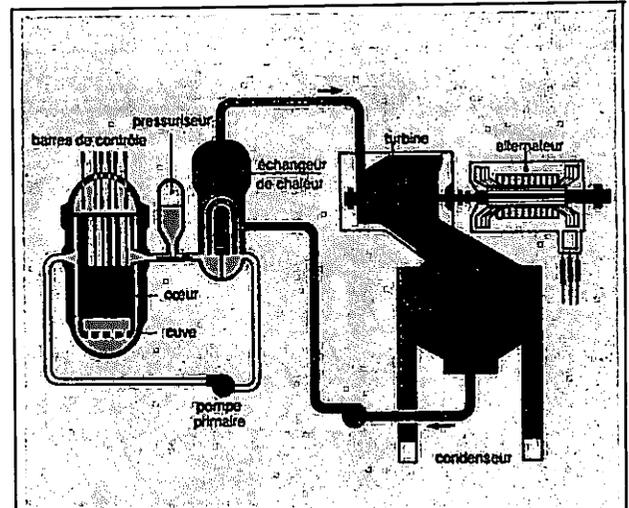
La filière REP (Réacteur à eau sous pression) utilise comme combustible l'uranium enrichi à 3 % d'uranium 235, l'eau comme modérateur au circuit primaire (sous pression pour éviter la formation de vapeur).

#### 1° LE RÉACTEUR (fig. 4.19)

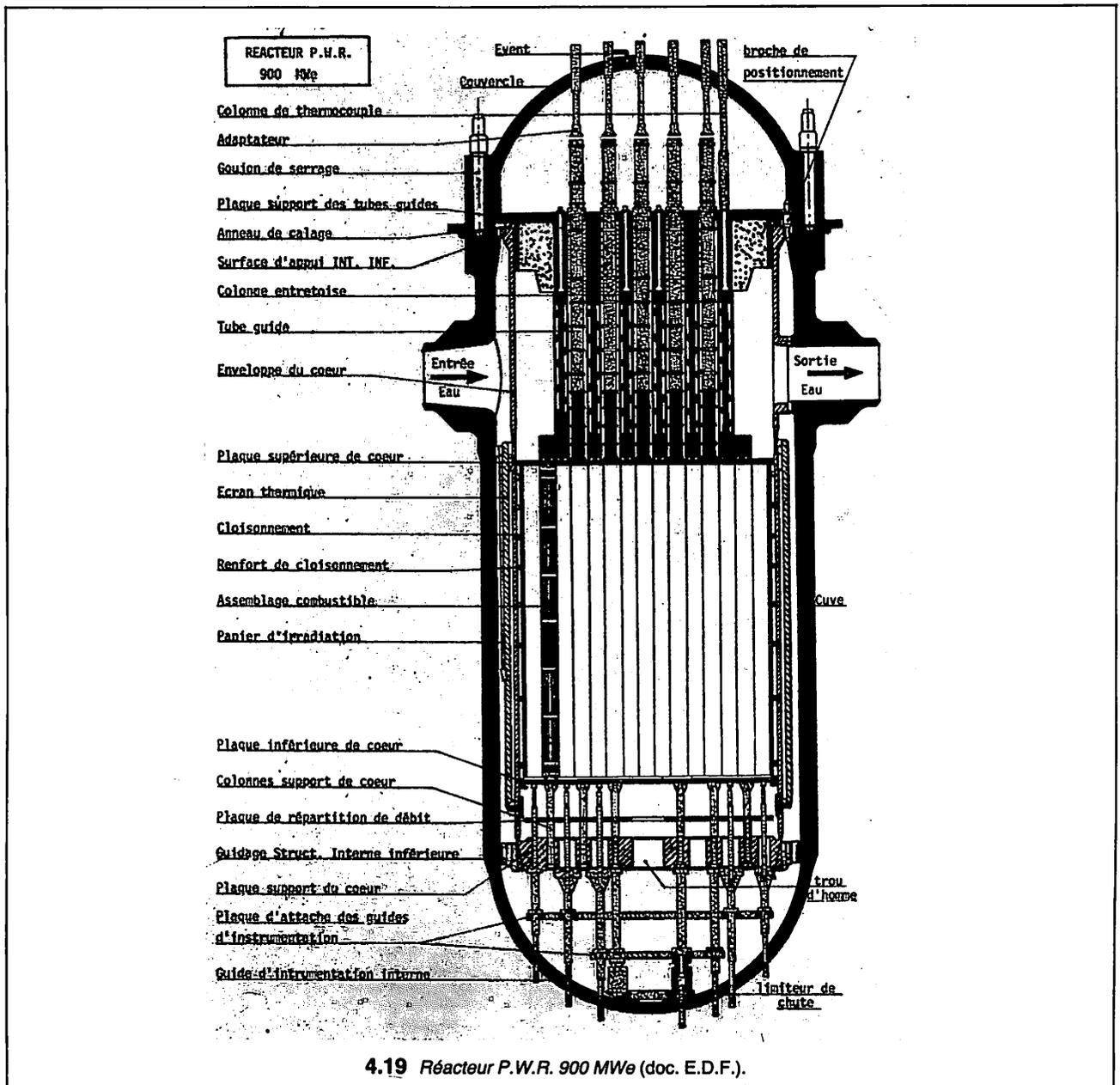
C'est une cuve cylindrique dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Diamètre intérieur : 3,98 m
- Hauteur totale : 12,32 m
- Épaisseur : 0,20 m
- Masse de la cuve : 263 T
- Masse du couvercle : 54 T
- Matière : acier 1,2 MD06 (ferritique à bas carbone)
- Revêtement intérieur : acier inoxydable

Le couvercle permet le passage des grappes de contrôle et des colonnes d'instrumentation de mesure.



4.18 Schéma de principe d'une centrale nucléaire avec réacteur à uranium enrichi et eau sous pression (REP) (doc. SODEL).



4.19 Réacteur P.W.R. 900 MWe (doc. E.D.F.).

### ● Cœur du réacteur

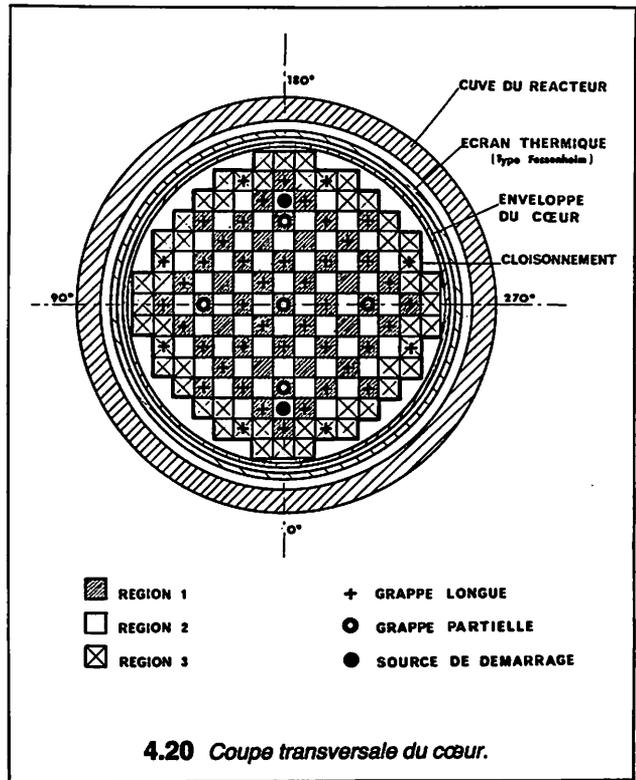
Il est constitué par 157 assemblages (fig. 4.20) d'éléments combustibles de 214 mm de côté et de 4 m de longueur. Un élément combustible comprend 264 crayons en zircaloy de 9,5 mm de diamètre, 3,66 m de longueur active. Dans chaque crayon sont empilées les pastilles frittées d'oxyde d'uranium  $UO_2$ . L'ensemble représente 41 000 crayons et une masse d'uranium de 70 T environ dont 1/3 est renouvelé tous les ans (fig. 4.21). Des grilles d'assemblage assurent la structure. Des barres de bore (53) peuvent être introduites par des tubes guides. Elles assurent la régulation (réglage de la puissance) et l'arrêt d'urgence quand on les laisse tomber en chute libre.

### ● Circuit d'eau primaire (fig. 4.22)

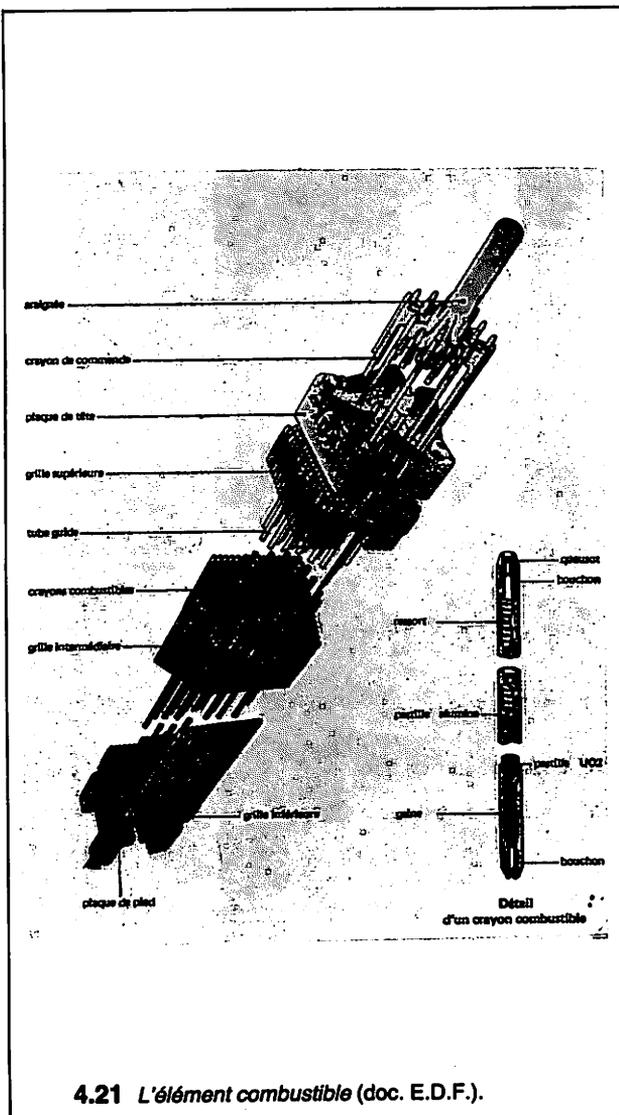
La cuve du réacteur est branchée sur 3 boucles de refroidissement. L'eau en circulation a un volume de 274 m<sup>3</sup>. L'eau indépendamment de son rôle modérateur, évacue la chaleur engendrée par la réaction nucléaire. Pour éviter la vaporisation, elle est maintenue à la pression de 155 bars par 3 pompes (une dans chaque boucle) entraînées par 3 moteurs asynchrones triphasés tournant à 1 485 tr/min. Le débit nominal de chaque groupe est de 21 150 m<sup>3</sup>/heure.

### ● Échangeur générateur de vapeur

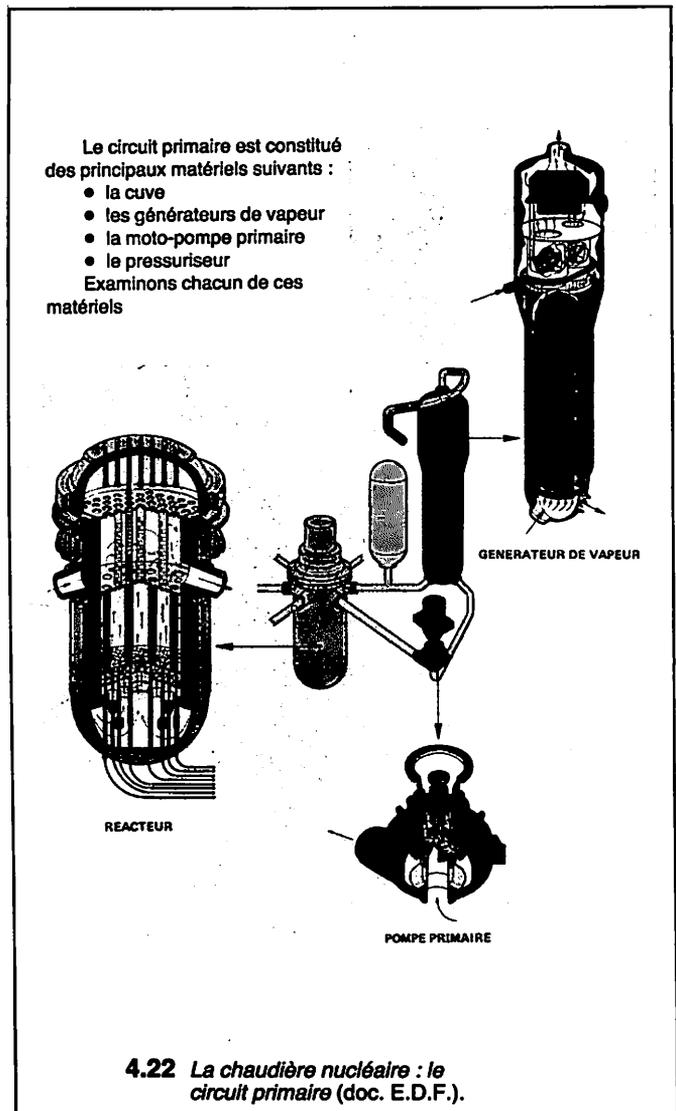
Le générateur est constitué essentiellement d'un élément chauffant : c'est le faisceau tubulaire d'eau primaire, qui vaporise l'eau du circuit secondaire. Un pressuriseur sur la branche chaude, à la sortie du réacteur, joue le rôle de vase d'expansion du circuit primaire.



4.20 Coupe transversale du cœur.



4.21 L'élément combustible (doc. E.D.F.).



4.22 La chaudière nucléaire : le circuit primaire (doc. E.D.F.).

Les caractéristiques de ces échanges thermiques dans le générateur sont résumés dans le tableau suivant :

	Circuit d'eau primaire	Circuit de vapeur secondaire
Température d'entrée	323,1 °C	219 °C
Température de sortie	285,6 °C	271 °C saturée
Pression absolue	155,2 bars	56 bars
Débit	15 893 T/heure	1 817 T/heure

L'eau pénètre à une température de 285 °C et sort à 323 °C. La quantité de chaleur ainsi extraite du réacteur est

$$Q = M C (T_s - T_e) \quad \text{avec } M = 12\,400 \text{ kg/s}$$

$$C = 5,75 \text{ kJ/kg}$$

$$T_s = 323 \text{ °C}$$

$$T_e = 285 \text{ °C}$$

$$Q = 12\,400 \times 5,75 (323 - 285) = 2\,760\,000 \text{ kJ}$$

Comme M est le débit par seconde, la puissance est  $P = 2\,760 \text{ MW}$  thermiques.

A la sortie de l'alternateur, on recueille 900 MW électriques, le rendement global est donc de 0,32.

## 2° LA TURBINE

La turbine transforme l'énergie calorifique de la vapeur en énergie mécanique. Elle est composée de plusieurs corps sur une même ligne d'arbre :

- Un corps Haute pression en 2 moitiés de 7 étages (fig. 4.23). Chaque rotor H P est en acier forgé massif portant à la périphérie les rainures de montage des ailettes.

- Trois corps Basse pression en 2 moitiés, de 7 étages chacun avec des ailettes frettées à chaud sur un fût en acier forgé.

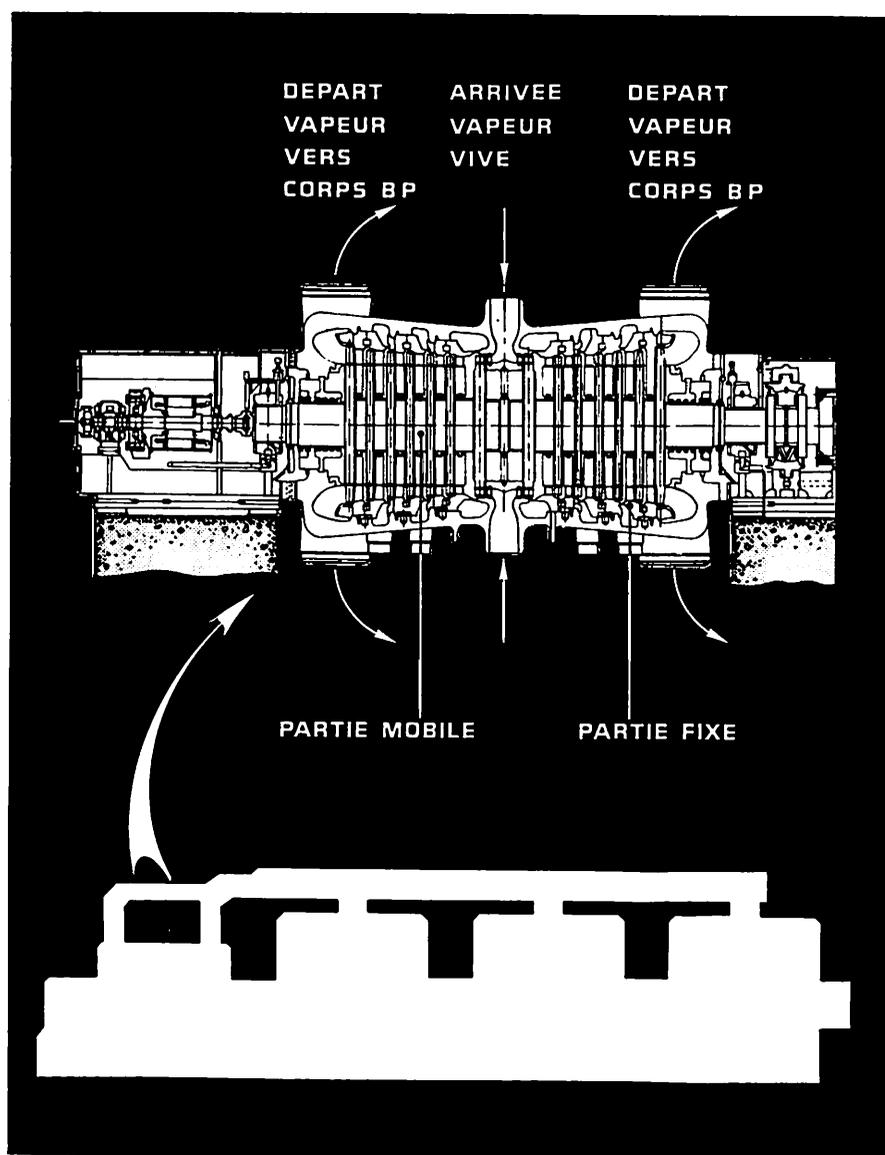
La vapeur est admise au centre des corps et se détend en deux flux égaux sur les 7 étages symétriques par rapport au centre.

A chacun des 3 corps B P est associé un corps de condenseur (fig. 4.24) dont le refroidissement est assuré selon deux possibilités par :

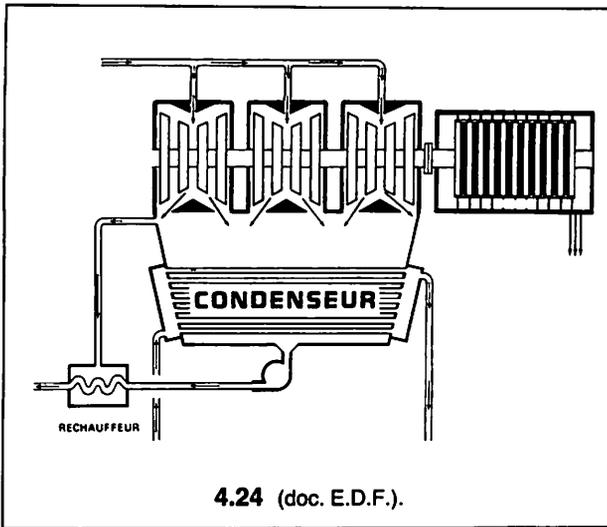
- pompage et rejet d'eau de fleuve ou de mer (en circuit ouvert) ou par ;
- tour de réfrigération humide à tirage naturel ou forcé (en circuit fermé).

Le débit des 3 corps de condenseurs est de 35 m<sup>3</sup>/s.

La turbine dispose en outre de 6 points de soutirage de la vapeur pour l'alimentation des réchauffeurs de l'eau primaire et de 4 éléments surchauffeurs à la sortie du corps H P destinés à améliorer la détente de la vapeur et à la surchauffer avant son admission dans les corps BP.



4.23 (doc. E.D.F.).



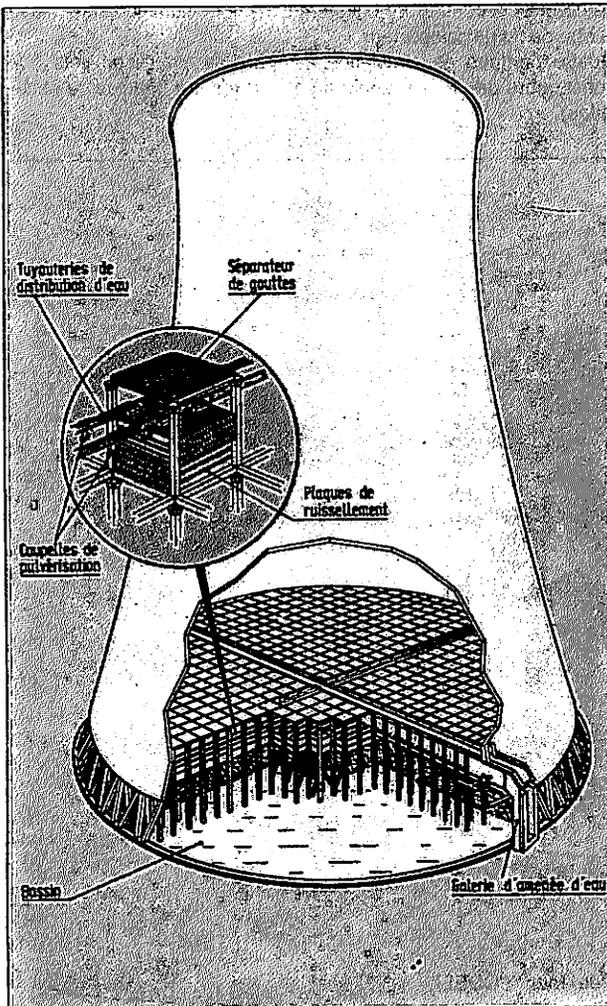
● **Caractéristiques de la turbine**

- Vitesse 1 500 tr/min.
- Débit de vapeur 5 450 T/h.
- Pression absolue 55 bars.
- Température 270 °C.
- Vide au condenseur 45,7 mbars

● **Circuit de refroidissement**

Il constitue la source froide permettant la condensation de la vapeur par les deux moyens vus précédemment.

**4.25 Réfrigérant atmosphérique à tirage naturel** (doc. SODEL).



**A circuit ouvert**

L'eau du fleuve ou de la mer est acheminée par un conduit de gros diamètre puis décantée et filtrée avant son passage dans le condenseur. Le débit est de 45 m<sup>3</sup>/s, l'eau est rejetée avec une augmentation de température de 10 °C.

**A circuit fermé**

L'eau venant du condenseur est pulvérisée en fines gouttelettes par le courant d'air ascendant de la tour (effet de cheminée), 1 à 2 m<sup>3</sup>/s sont vaporisés et perdus par évaporation soit environ 5 %. L'autre partie est arrêtée par les séparateurs de gouttes et recyclée dans le circuit (fig. 4.25).

Pour une tranche de 900 MW la tour a une hauteur de 165 m, un diamètre à la base de 128 m et une épaisseur au col de 0,23 m. La surface interne est de 6 ha. La différence de température est de 20 à 25 °C soit un gradient d'échange d'environ 15 °C.

Les formes vont de l'hyperboloïde au tore hyperbolique avec en partie basse un tronc de cône implanté sur poteaux.

**3° PILOTAGE DU RÉACTEUR**

Le pilotage à court terme exige un temps de réponse de quelques secondes. C'est par l'introduction des grappes de commande que s'opère ce pilotage. Les grappes sont manipulées par un cric magnétique autorisant 3 fonctions à l'aide de 3 bobines magnétiques jouant le rôle d'électroaimants : maintien, transfert, mouvement avec verrouillage de la descente par un grappin sur un arbre cannelé.

La température moyenne (environ 300 °C) sert d'information pour le contrôle de la puissance thermique et son adaptation à la puissance mécanique absorbée par le turbo alternateur.

On dispose de deux chaînes de régulation : une chaîne fermée et une chaîne ouverte dont les actions se conjuguent à partir des capteurs (températures et puissances) pour délivrer les signaux de régulation.

Le pilotage à long terme tient compte de la variation de réactivité du cœur. C'est en contrôlant la concentration en bore (1 000 ppm dans l'eau) qu'on obtient un effet modérateur approprié à cette réactivité. L'adjonction d'acide borique absorbant de neutrons influe sur  $\phi$ , le facteur de réactivité.

**4° PROTECTION ET SÉCURITÉ**

La protection réside dans l'agencement général et les différentes barrières placées entre le combustible et l'extérieur :

- gaine combustible ;
- enceinte du réacteur (cuve acier de 20 cm d'épaisseur) ;
- bâtiment du réacteur (béton de 2 m d'épaisseur).

Les chaînes d'arrêt d'urgence obéissent aux impératifs de température et de surpuissance.

Tous les cas de figures sont analysés et détectés.

Les détecteurs d'ions et de neutrons délivrent des courants qui sont amplifiés et traités dans ces chaînes.

La mesure du flux neutronique étant l'élément primordial d'information.

● **Environnement d'une centrale nucléaire**

L'impact d'une centrale nucléaire sur l'environnement fait l'objet de nombreuses controverses. Les rejets de chaleur, les rejets radioactifs, l'élimination des déchets, les constructions imposantes comme les tours de réfrigération, constituent autant de problèmes à résoudre lors du choix du site d'implantation.

● **Rejets de chaleur**

Une centrale de 2 760 MW thermiques produit 900 MW électriques. Cette déperdition de 68 % de la quantité de chaleur dégagée est le fait des circuits d'échange et de refroidissement. Dans le cas de circuits ouverts sur rivières les rejets provoquent une élévation de température de 1,5 °C à 4 °C environ dans les eaux aval. Le milieu marin et la faune aquatique sont en général peu affectés si les débits des fleuves sont importants même en régime de basses eaux.

Les tours des aéroréfrigérants émettent des panaches de vapeur d'eau et ces nuages sont soumis au régime des vents de la région. La couverture nuageuse est cependant de faible importance.

● **Rejets radioactifs**

Les produits de fission sont à classer selon leur taux de radioactivité, leur période (durée de vie) et leur nocivité.

On peut stocker les déchets solides à faible radioactivité dans des coques préfabriquées en béton, les boues dans des coquilles à base de résine thermodurcissable.

Les produits très radioactifs sont calcinés dans un four rotatif puis introduit avec de la fibre de verre dans un four en fusion à 1 100 °C. Les blocs de verre ainsi obtenus sont placés en containers en acier inox puis stockés en souterrains dans des formations géologiques stables.

Une tranche nucléaire de 1 000 MW produit annuellement 13,5 m<sup>3</sup> de déchets hautement radioactifs et 493 m<sup>3</sup> de déchets faiblement radioactifs.

Les déchets sont traités à l'usine de la Hague près de Cherbourg et stockés aux environs dans l'attente d'un site souterrain approprié.

● **Évaluation des dangers dûs à la radioactivité**

Les éléments radioactifs présentent des dangers en raison de leur fixation sur des organes du corps humain de façon élective et cumulative (poumons, thyroïde, etc.).

Les hypothèses actuelles définissent mal les seuils de nocivité ; le radiodiagnostic ne fait pas l'objet de dosimétrie.

Les niveaux d'irradiations médicales utilisés en thérapie sont de beaucoup supérieurs à l'irradiation naturelle. Les risques cancéri-

gènes sont certains pour les fortes irradiations mais on ignore (experts de l'O.M.S.) s'il existe une relation de proportionnalité entre la dose et l'effet dans le cas de doses faibles.

On ne dispose donc pas de statistiques basées sur des expériences ou des enquêtes épidémiologiques. L'impact des rayonnements ionisants sur l'A D N provoque une détérioration irréversible au niveau d'un gène. Il semble qu'un seuil de 2 sieverts induise des leucémies (population irradiée à Nagasaki) 3 sieverts des effets génétiques, etc.

● **Coût de production de l'énergie d'origine thermique**

Le tableau comparatif (fig. 4.26) donne l'avantage au combustible nucléaire.

**6. SURRÉGÉNÉRATEUR**

● **Constitution du réacteur** (fig. 4.27)

Le réacteur se présente sous la forme d'une cuve de 21 m de diamètre. Le cœur comporte 364 assemblages de tubes hexagonaux de 5,4 m de longueur contenant chacun 271 « aiguilles » en acier inoxydable de 2,7 m de hauteur et un diamètre extérieur de 8,65 mm (fig. 4.28).

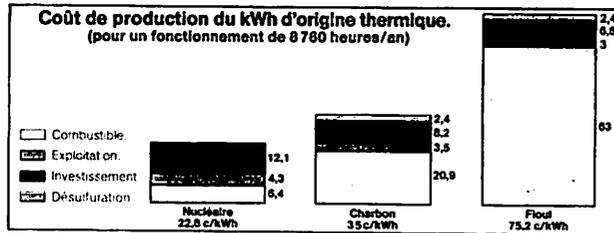
Ces aiguilles (creuses) contiennent 15 % d'éléments fissibles U O<sub>2</sub> + Pu O<sub>2</sub> oxydes d'uranium et de plutonium, environ 36 tonnes. Leur puissance spécifique est de 285 kW thermiques/dm<sup>3</sup>, soit 3 000 MW au total.

L'enveloppe fissile disposée autour de ce cœur comprend trois couronnes d'assemblages constituées pour 80 % de U<sup>238</sup> fertiles puis de 20 % de Pu<sup>239</sup> fissibles.

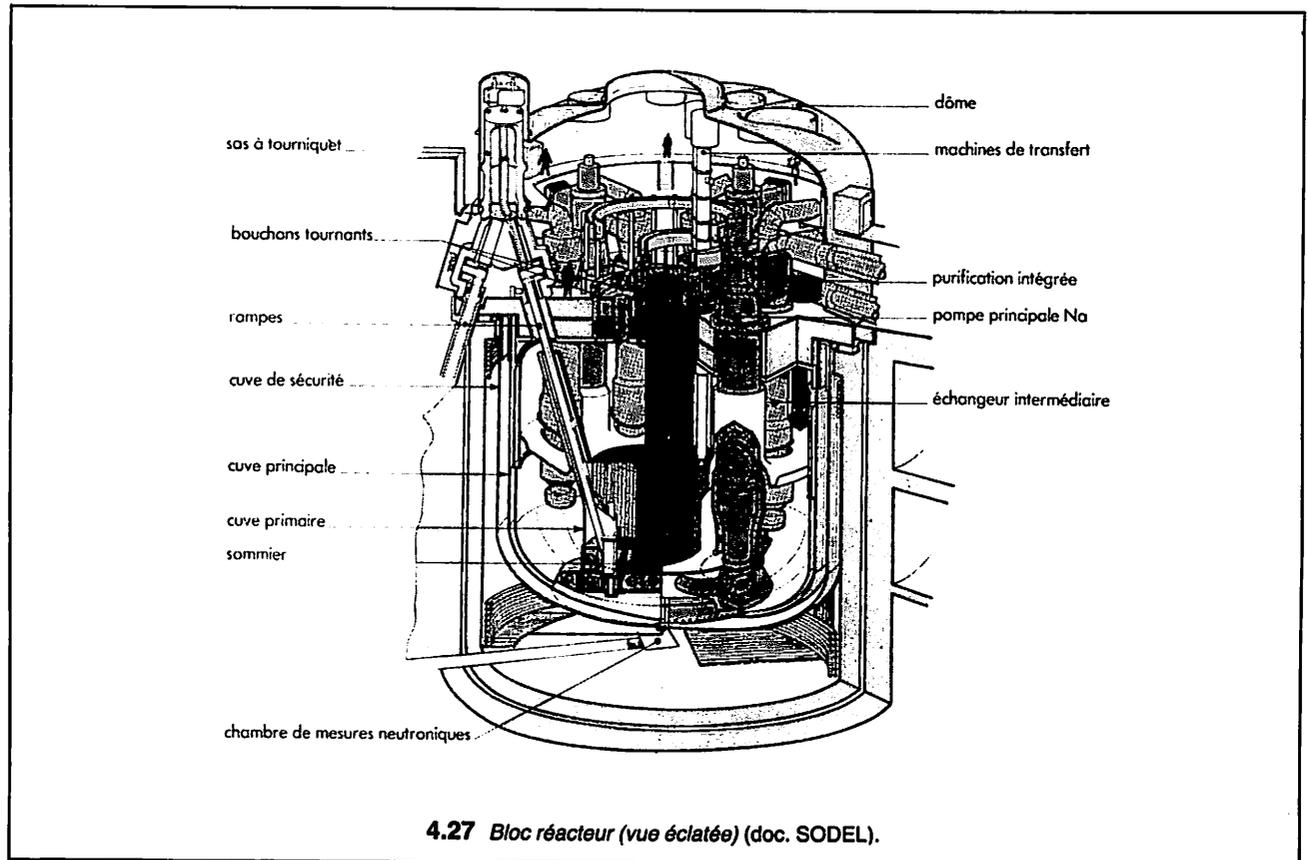
Au-delà, des éléments en acier et en carbure de bore constituent une barrière neutronique.

Le cœur et la couverture baignent dans le sodium liquide qui joue le rôle de fluide caloporteur.

Quatre pompes de circulation assurent sa circulation vers huit échangeurs de chaleur sodium/sodium (quatre boucles de circulation).



4.26 Chiffres donnés en centimes par kWh (1985).



4.27 Bloc réacteur (vue éclatée) (doc. SODEL).

Le contrôle et l'arrêt de la réaction sont assurés par deux dispositifs de 10 et 11 barres indépendants (fig. 4.29).

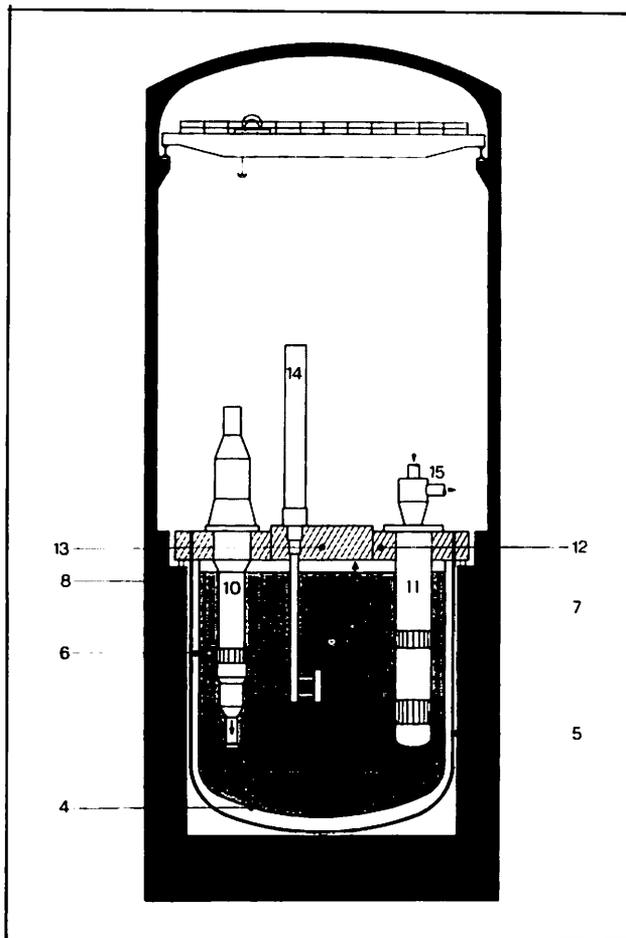
La cuve a une atmosphère d'argon au-dessus du sodium pour éviter toute oxydation. Des réseaux de tubes où circule une eau de refroidissement permettraient de pallier à une insuffisance de la circulation du sodium en limitant la température à 700 °C.

Enfin une enceinte générale de confinement en béton armé de 80 m de hauteur et de 64 m de diamètre abrite l'ensemble, y compris le système de manutention et de stockage provisoire du combustible irradié (fig. 4.30).

Il y a donc 4 barrières de protection :

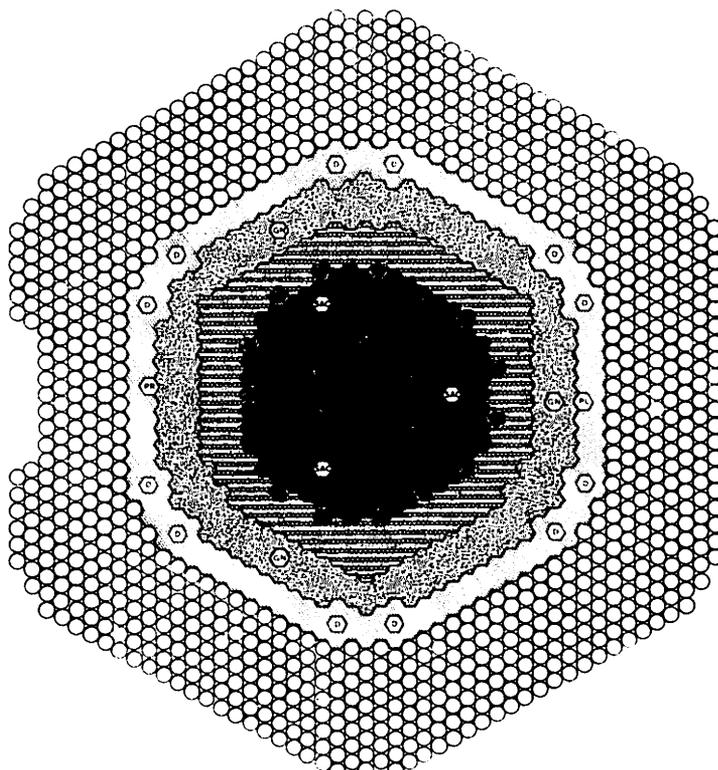
- la gaine du combustible ;
- l'enceinte cuve + dalle ;
- l'enceinte primaire cuve de sécurité + dôme acier ;
- l'enceinte secondaire bâtiment du réacteur.

- 1 cœur
- 2 couverture
- 3 sodium primaire
- 4 1<sup>re</sup> cuve
- 5 2<sup>e</sup> cuve
- 6 espace rempli d'azote
- 7 béton de protection
- 8 enceinte étanche
- 9 matelas d'argon
- 10 pompe de circulation du sodium
- 11 échangeur
- 12 dalle de fermeture
- 13 bouchon tournant
- 14 bras de transfert du combustible
- 15 sodium secondaire (arrivée et départ)

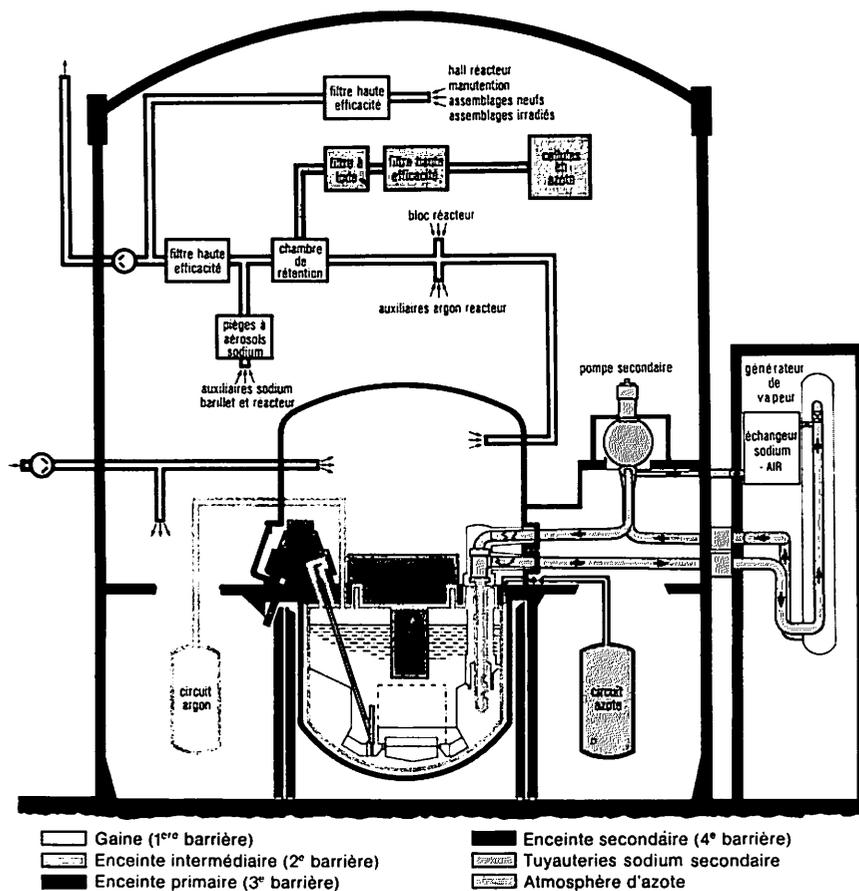


4.29 Coupe d'un réacteur à neutrons rapides (doc. SODEL). ▶

4.28 Plan du cœur du Super-Phénix. (doc. SODEL).



- |                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| ● 193 assemblages combustibles zone 1 | ○ 1076 assemblages constituant la protection neutronique laterale |
| ● 171 assemblages combustibles zone 2 | ○ 3 guides de neutrons (mesure de flux)                           |
| ● 21 barres de commande principales   | ○ 12 assemblages de deverminage (de reserve)                      |
| ● 233 assemblages fertiles            | ○ 3 barres de commande complementaires                            |
| ○ 198 assemblages acier               |   |



4.30 Système de confinement de la centrale (doc. SODEL).

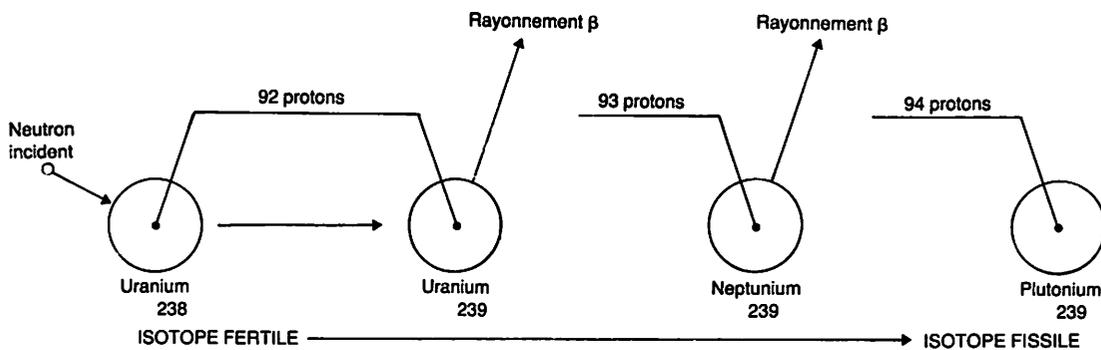
● Principe de fonctionnement

Le cœur entretient une réaction de fission par des neutrons rapides (15 000 à 20 000 km/s) en direction de la couverture fertile  $U^{238}$  puis fissible  $Pu^{239}$  selon le schéma des réactions (fig. 4.31). L'uranium 238 fertile devient fissile dans des proportions importantes en se transformant en plutonium, ce qui autorise à dire que le surrégénérateur fabrique plus de matière fissile qu'il n'en consomme : partant de l'uranium 238 non fissile on obtient du plutonium en excédent. Le taux de régénération du combustible est de 1,12.

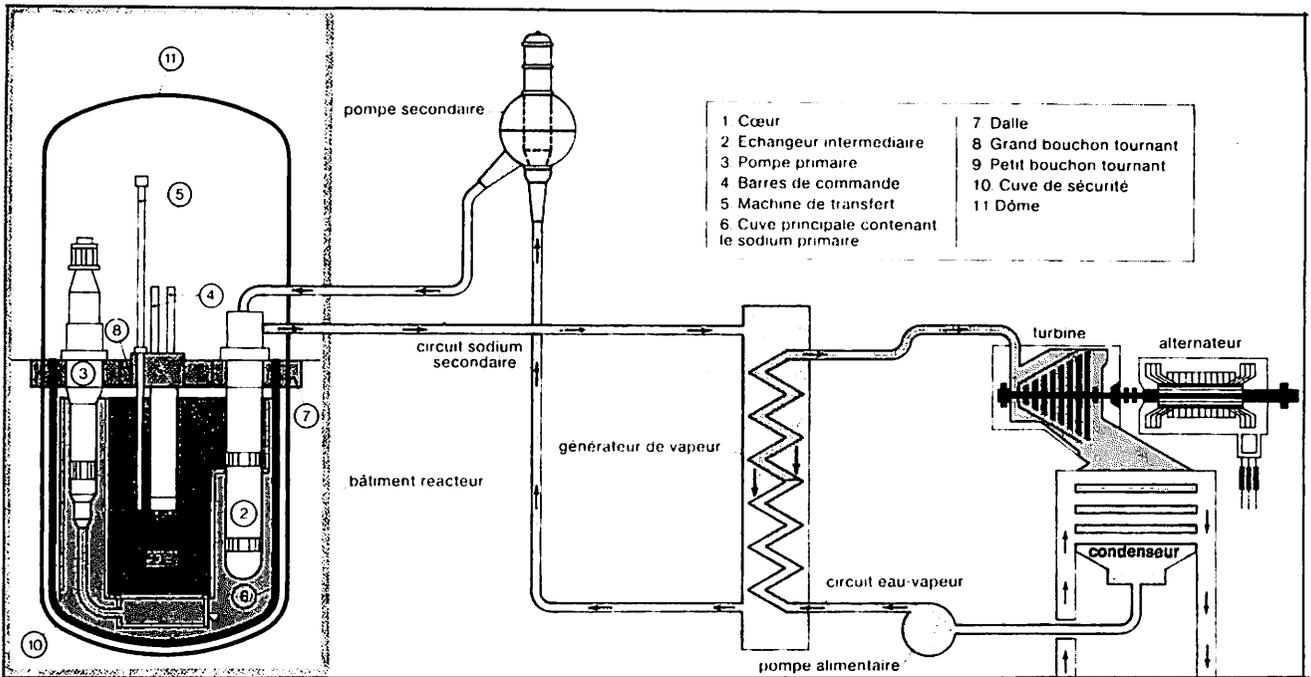
La puissance thermique spécifique est élevée (4 fois celle d'un réacteur PWR) ce qui impose un fluide caloporteur à grande chaleur spécifique, le sodium est liquide à 98 °C, il ne bout qu'après 900 °C. L'affinité sodium-oxygène, la radioactivité après passage dans le cœur présentent des difficultés sérieuses.

Le problème est résolu par l'installation de 3 circuits indépendants :

- un circuit sodium primaire qui intéresse le réacteur avec un premier échangeur ;
- un circuit secondaire encore au sodium qui intéresse un second échangeur ;
- un circuit eau-vapeur qui va vers la turbine (fig. 4.32).



4.31 Formation du plutonium à partir d'uranium 238.



4.32 Schéma d'un réacteur à neutrons rapide comportant deux circuits de sodium (doc. SODEL).

## 7. CENTRALE SUPER-PHÉNIX

### • Caractéristiques principales de la centrale

#### CARACTÉRISTIQUES THERMODYNAMIQUES

- Puissance thermique .....	3000	MW
- Puissance électrique brute .....	1200	MW
- Rendement brut .....	40	%
- Circuit primaire : Nature - Type .....	Sodium	Intégré
- Masse de sodium .....	3300	Tonnes
- Nombre de pompes .....	4	
- Température à l'entrée du cœur ..	395	°C
à la sortie du cœur ..	545	°C
- Débit total (pompes) .....	16.400	kg/s
- Circuit secondaire : Nature - Type ..	Sodium	A boucles
- Nombre de boucles et de pompes .....	4-4	
- Nombre d'échangeurs intermédiaires .....	8	
- Température à l'entrée des échangeurs intermédiaires .....	345	°C
- Température à la sortie des échangeurs intermédiaires .....	525	°C
- Débit total (pompes) .....	13.200	kg/s
- Masse totale de sodium dans les 4 boucles .....	1.700	Tonnes
- Circuit tertiaire : Nature .....	Eau - vapeur	
- Nombre de générateurs de vapeur .....	1 par boucle secondaire	
- Température de la vapeur surchauffée .....	490	°C
- Pression de la vapeur surchauffée .....	180	bars
- Débit total de vapeur .....	1360	kg/s

#### CARACTÉRISTIQUE DU CŒUR

- Flux neutronique maximal .....	$6,110^{15}$	n/cm <sup>2</sup> s.
- Puissance spécifique maximale .....	0,30	MW/l
- Hauteur du cœur .....	1	m
- Assemblages combustibles :		
- Nombre .....	364	
- Longueur d'un assemblage .....	5,4	m
- Nature du combustible .....	UO <sub>2</sub> - PUO <sub>2</sub>	
- Nombre d'aiguilles .....	271	
- Température nominale maximale de gaine .....	620	°C
- Taux de combustion maximal .....	70.000	MWJ/T
- Durée de vie du cœur avec un facteur de charge de 0,85 .....	850	Jours
- Durée entre deux campagnes de maintenance .....	12	mois
- Gain total de régénération .....	0,2	

### • Avantages du surrégénérateur

#### Combustible

A partir d'une même masse d'uranium naturel, on peut obtenir 80 fois plus d'énergie qu'avec les autres filières.

#### Chaîne thermodynamique

Elle se situe dans des niveaux de température et de pression beaucoup plus favorables : 525 °C dans le cœur, vapeur à 490 °C et pression de 180 bars, au lieu de 323 °C et 155 bars dans un réacteur PWR. Le rendement de la turbine est amélioré, ce qui entraîne un rendement global de la centrale de 40 % environ.

### • Inconvénients du surrégénérateur

#### Contrôle de la réaction

Il nécessite un surcroît de précautions. La conception de l'ensemble, les sécurités redondantes qui ont été prises laissent présager cependant que le réacteur est parfaitement contrôlable et que tout risque d'explosion nucléaire est exclu.

Le sodium est manipulé, purifié et pompé avec le maximum de précautions.

#### Toxicité des produits radioactifs

Le plutonium présente des dangers par inhalation. Il peut se fixer comme nous l'avons vu précédemment sur certains organes (squelette et foie). Toutes précautions doivent être prises pour définir les risques et les limites de sécurité.

### • Bilan économique : prix du kWh

Dans l'état actuel des techniques et du marché des combustibles (1987), le prix de revient du kWh est peu attrayant.

# 5. L'ALTERNATEUR

L'alternateur est un générateur synchrone triphasé.

## 1. CONSTITUTION GÉNÉRALE

L'alternateur comprend un stator et un rotor ou roue polaire.

Le stator est le siège des courants induits, le rotor porte les pôles inducteurs alimentés en courant continu.

En raison des puissances mises en jeu, la construction d'un gros alternateur pose des problèmes complexes et très éloignés des petits alternateurs vus précédemment (Tome 1 - Thème 5 - Les groupes électrogènes.)

L'amélioration des caractéristiques des alternateurs pendant ces 30 dernières années résulte d'une augmentation progressive de l'induction (B) dans les circuits magnétiques et de la densité de courant dans les conducteurs ou charge linéique ( $A \cdot C \cdot m^{-1}$ ) ou ampères conducteurs par mètre.

La masse spécifique d'un alternateur de 156 MVA (125 MW) de l'ordre de 1,5 kg/kVA en 1950 est passée de 0,45 kg/kVA soit 3 fois moins pour un alternateur de 1650 MVA (1485 MW).

La comparaison des volumes de ces mêmes machines confirme les progrès réalisés (fig. 5.1).

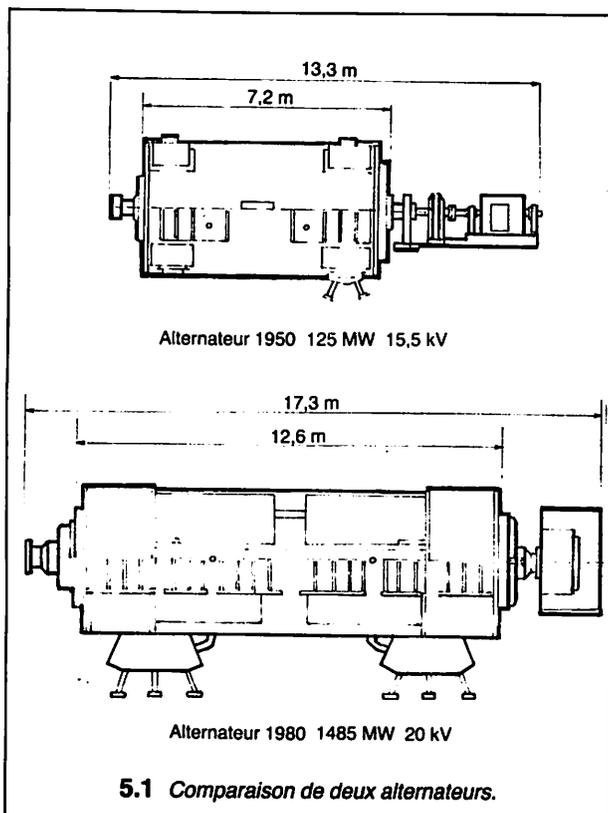
Malgré les rendements élevés de ces alternateurs (0,95 à 0,98) les pertes, inhérentes à toute machine électrique, sont considérables. Pour un alternateur de 1485 MW des pertes de 2 % représentent 30 000 kW !!

Pour dissiper la chaleur correspondante deux systèmes, étudiés plus loin, sont mis en jeu : par eau et hydrogène.

Enfin l'alimentation en courant continu des inducteurs est assurée par un alternateur spécial associé à des semi-conducteurs.

## 2. STATOR

La carcasse contenant le stator est une structure en tôle mécanosoudée capable de résister à la pression développée par l'explosion du mélange air-hydrogène (fig. 5.2).



### • Circuit magnétique

Le stator est un assemblage de tôles magnétiques à cristaux orientés d'une épaisseur de 0,35 mm isolées entre elles par émaillage au four pour limiter les courants de Foucault.

Ces tôles ont des pertes réduites de l'ordre de 1,11 W/kg pour une induction de 1,5 tesla à 50 Hz.

Pour atténuer la transmission des vibrations radiales à la carcasse et aux fondations (vibrations à fréquence 100 Hz) les barreaux d'empilage des tôles sont fixés à la carcasse par un dispositif découpleur de vibrations (barreaux-ressorts).

L'ensemble des tôles est serré au moyen de 2 plateaux d'extrémité en acier massif vissés contre les extrémités des barreaux d'empilage.

Un écran en cuivre protège chaque plateau du flux magnétique alternatif développé par les têtes de bobines.

### • Enroulement statorique

Chaque encoche reçoit deux barres isolées pour la tension maximale de phase, à l'aide d'un ruban constitué de soie de verre et de papier mica, préimprégné au moyen de résines synthétiques époxydes (procédé Isotenax N d'ALSTHOM).

L'enrubannage (y compris des têtes de bobines) est polymérisé à chaud et sous pression.

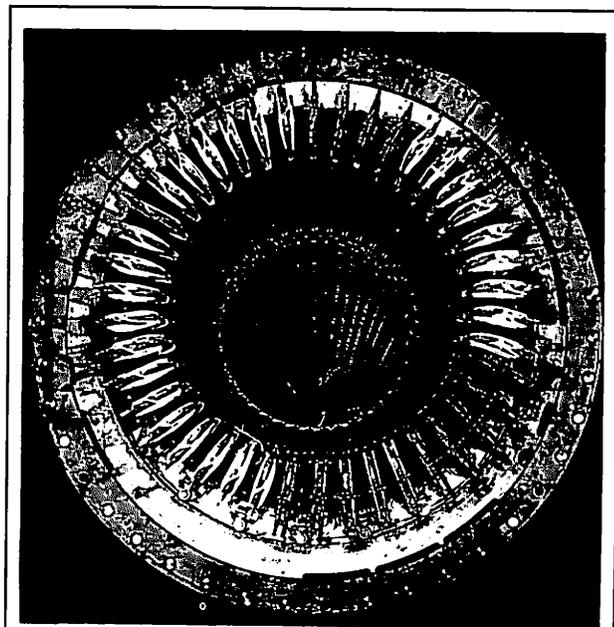
Les barres sont constituées par un ensemble de brins de cuivre mixtes pleins et creux (2 conducteurs pleins pour un conducteur creux).

Le conducteur creux autorise la circulation de l'eau de refroidissement.

Ces brins ne sont pas constamment parallèles entre eux mais transposés selon une rotation variant de 360 à 540 degrés (procédé Roebel). Cette méthode a pour effet de limiter les courants de circulation.

Une « boîte à eau » en cuivre massif brasée à chaque extrémité de barre assure à la fois les liaisons électriques et les connexions hydrauliques au moyen de tubes en téflon. La température de l'eau est limitée à 85 °C.

Un détecteur de température signale pour chaque boîte toute anomalie.



Les barres sont soumises à des efforts électrodynamiques considérables notamment en cas de surintensités accidentelles ainsi qu'à des vibrations destructives.

Pour les maintenir dans l'encoche un double calage est nécessaire : cales de fermeture biseautées et cales latérales.

Enfin les têtes de bobines agencées en développantes frontales sur deux plans sont soutenues par des anneaux et bridées. Des matériaux isolants thermo-durcissables assurent les rigidités mécanique et diélectrique (isolation ISOTENAX).

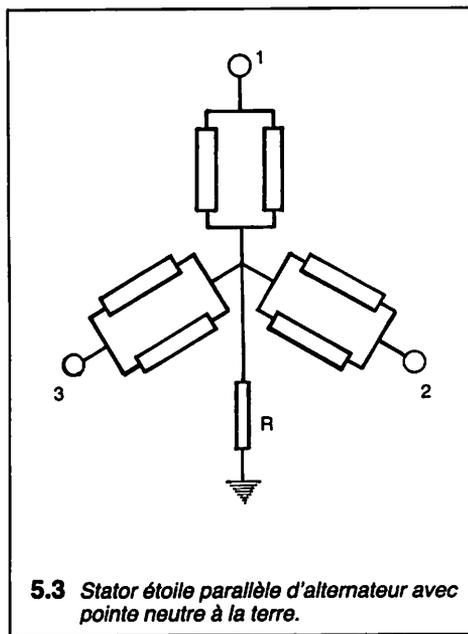
La tension nominale est comprise entre 20 et 30 kV et le courant par phase est actuellement limité à 50 kA.

● **Schéma du stator** (fig. 5.3)

Chaque phase comprend deux enroulements en parallèle et les 3 phases sont couplées en étoile à l'aide des 6 bornes habituelles. Le point étoile constitue le neutre mis à la terre à travers une résistance de limitation du courant de défaut.

Les bornes de sortie sont logées dans un caisson inférieur refroidi par circulation d'hydrogène.

Ce mode de refroidissement est étudié page suivante.



**3. ROTOR** (fig. 5.4)

Le rotor est un arbre usiné dans une pièce de forge unique en acier au nickel chrome. Des arbres de 237 tonnes issus d'un lingot de 500 tonnes sont couramment produits.

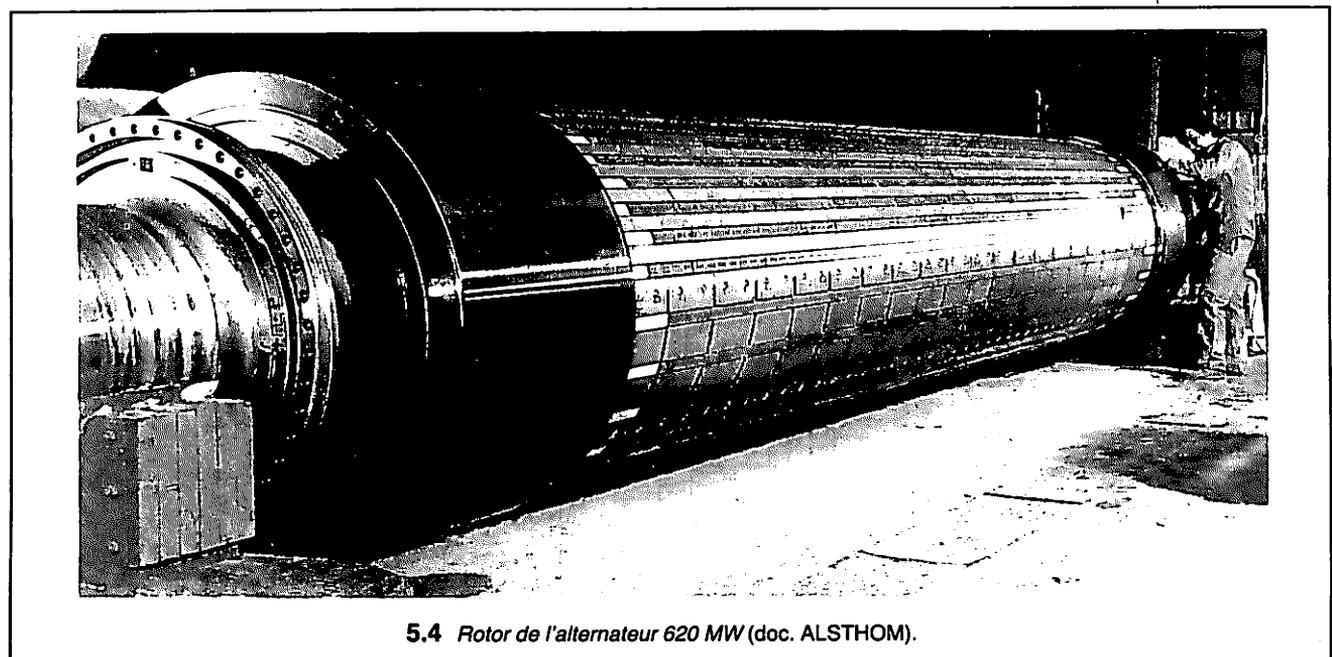
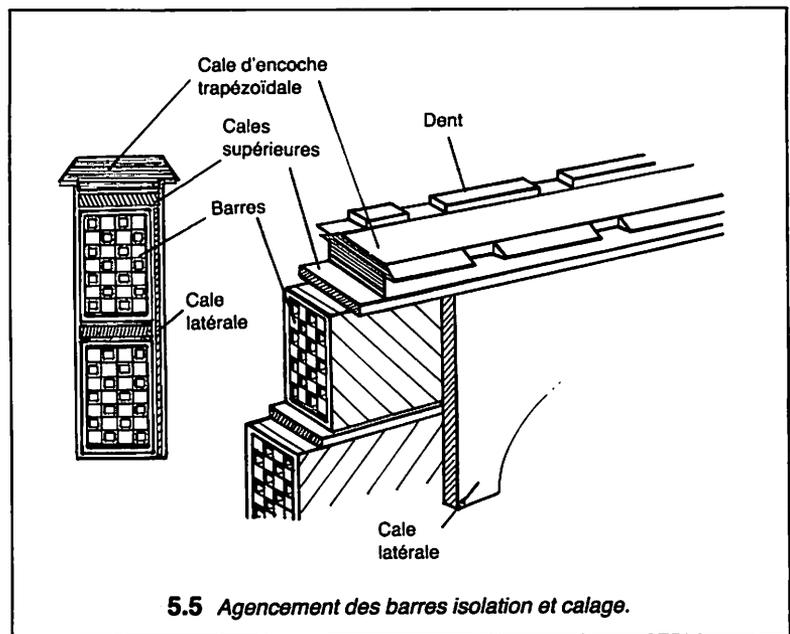
Dans cet arbre des entailles fraisées constituent les encoches qui reçoivent les enroulements inducteurs bipolaires.

Ces enroulements disposés en bobines concentriques de conducteurs méplats en cuivre, isolés entre spires par des entremises isolantes à base de stratifiés en verre époxy.

L'isolation par rapport à la masse comprend des réglettes au fond de l'encoche et à la partie supérieure des bobines et un assemblage de panneaux en stratifié isolants sur les flancs (fig. 5.5).

Les têtes de bobines soumises aux efforts centrifuges sont frettes. En réaltré ces frettes sont des capots en acier de forte épaisseur qui coiffent les têtes de bobines. C'est un acier austénitique à base de 18 % de manganèse et de 4 % de chrome.

Le rotor est muni d'un enroulement amortisseur formant une cage d'écureuil complète analogue à celle des rotors en court-circuit. Cet enroulement en barres de cuivre est logé sous les cales de fermeture d'encoche. Ces barres sont réunies à une couronne de court-circuit.



La cage de l'amortisseur canalise une grande partie des courants de fréquences supérieures, induits à la surface du rotor. En assurant l'écoulement des courants de surface elle réduit les pertes et autorise en partie le fonctionnement en régime déséquilibré  $I_2/I_n$ . Les paliers, en général identiques à ceux de la turbine, sont incorporés dans les flasques d'extrémité du stator. Ils sont du type à « patins oscillants ».

#### 4. REFROIDISSEMENT - VENTILATION

Le refroidissement est assuré par circulation d'eau désionisée en circuit fermé dans les barres statoriques et par l'hydrogène qui circule dans l'ensemble de la machine également en circuit fermé. Le circuit d'eau passe par une bache tampon de plusieurs m<sup>3</sup> sur le retour d'eau chaude.

L'hydrogène froid est admis dans le fût du rotor, circule par des canaux axiaux situés sous les bobines d'excitation et est déchargé dans l'entrefer par des événements radiaux. Les circuits autogénérateurs de gaz avec ventilateurs hélicoïdaux assurent un débit de plusieurs dizaines de m<sup>3</sup> par seconde sous une pression pouvant atteindre 4 bars. La capacité d'évacuation thermique de l'hydrogène est de l'ordre de 1,5 à 2 % de celle de l'eau.

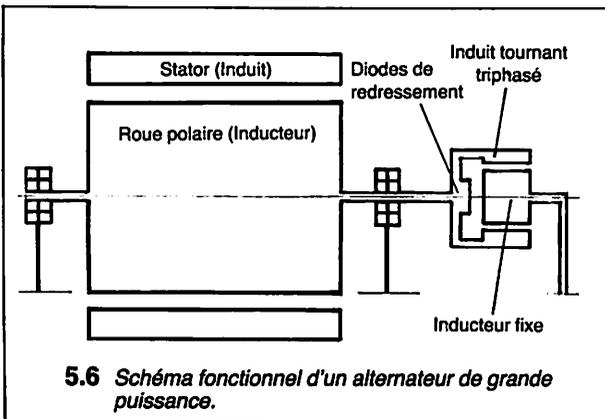
De plus un ventilateur axial est fixé à chaque extrémité du rotor et améliore la circulation de l'hydrogène à travers l'alternateur.

L'étanchéité des 2 traversées d'arbre est obtenue par des joints à film d'huile sous pression.

#### 5. EXCITATION DE L'ALTERNATEUR

Les différents mode d'excitation sont étudiés au tome 1, thème 5. Dans les gros alternateurs actuels le courant inducteur est fourni par un alternateur inversé : l'inducteur intérieur est fixe et l'induit extérieur tourne avec le rotor principal (fig. 5.6).

L'induit de l'excitateur est un enroulement polyphasé à grand nombre de phases fermé sur lui-même (couplage en polygone).

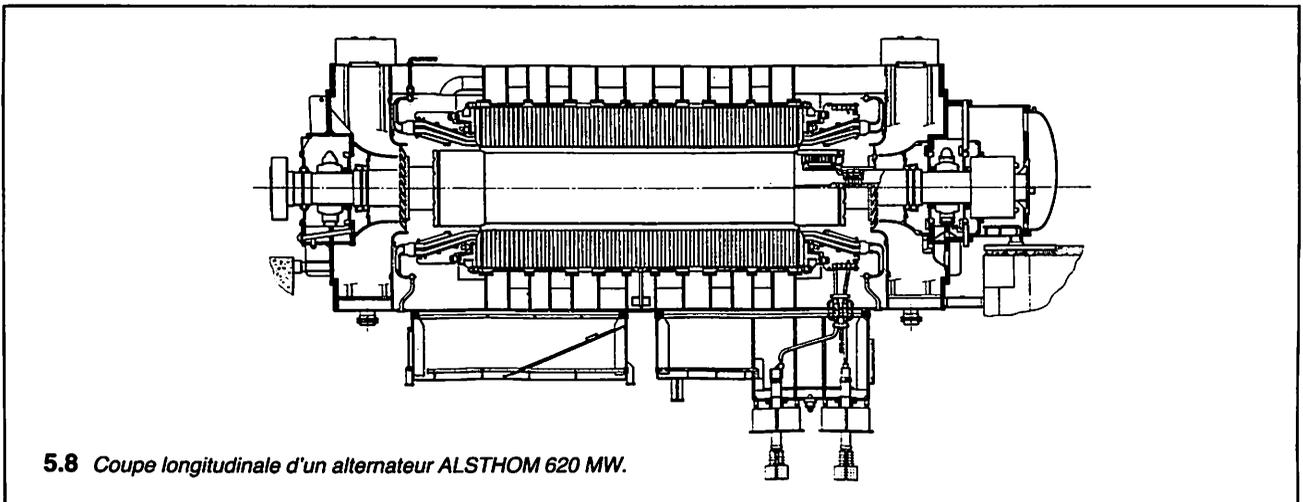
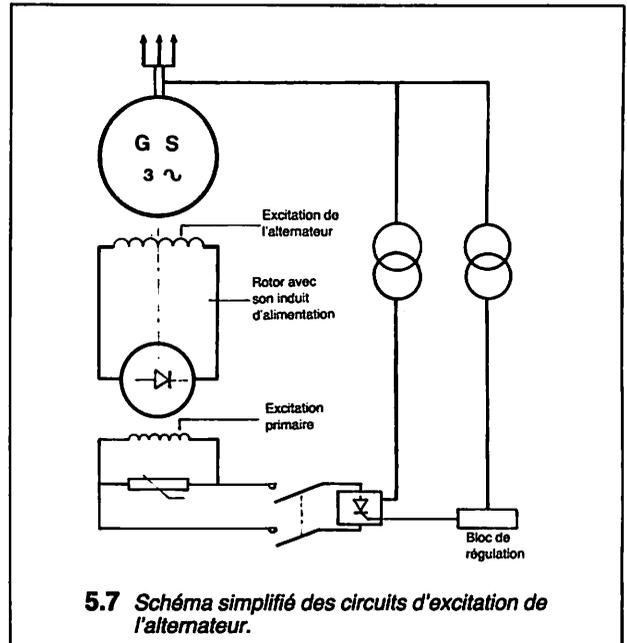


Chaque phase est associée à 2 diodes. Le courant ainsi redressé a un très faible taux d'ondulation. Ce courant pseudo continu est acheminé directement, sans bagues ni balais vers l'inducteur de l'alternateur.

L'inducteur de l'excitateur absorbe une puissance de quelques kW. Il est alimenté par transformateur et un pont de thyristors à partir du propre courant de l'alternateur ou en secours par des sources auxiliaires de la centrale (fig. 5.7).

#### 6. CARACTÉRISTIQUES D'UN ALTERNATEUR DE 620 MW - ALSTHOM (fig. 5.8)

Puissance active :	620 MW
Puissance apparente :	689 MVA
Facteur de puissance :	$\cos \varphi = 0,9$
Tension de sortie :	20 kV
Courant :	19887 A
Courant d'excitation de rotor :	3000 A sous 570 V (1710 kW)
Longueur de fer (circuit magnétique) :	6,40 m
Diamètre du rotor :	1,165 m
Diamètre extérieur du stator :	3,93 m
Longueur hors tout :	13,620 m
Masses stator	344 tonnes
rotor	75 tonnes
totales	419 tonnes



# 6. TRANSPORT DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Dans le tome 1 – thème n° 4, nous avons étudié la distribution de l'énergie électrique à partir d'une cabine ou poste de transformation. Les lignes Haute tension se situent entre l'usine ou centrale électrique et les transformateurs des sous stations (fig. 6.1).

## 1. CLASSEMENT DES LIGNES HAUTE TENSION

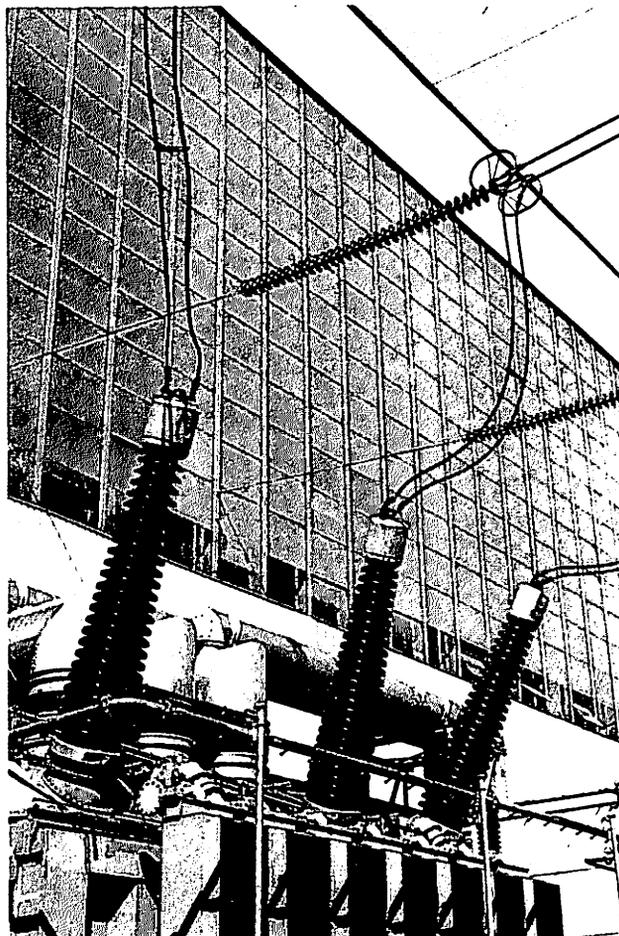
On classe les lignes haute tension en ouvrages de distribution pour les tensions inférieures à 63 000 V et en ouvrages de transport pour les tensions de 63 kV, 90 kV, 150 kV, 225 kV et 400 kV. On peut dire en première approximation que les pertes dans les lignes électriques sont inversement proportionnelles à la tension pour une même puissance transportée. Le courant alternatif engendre des pertes supplémentaires, pertes inductives et capacitatives liées à la fréquence ainsi que des pertes par effet Corona (décharge disruptive due à l'ionisation de l'air autour du câble et qui se manifeste par une couronne lumineuse).

Une ligne à 400 kV transporte environ l'équivalent de 4 lignes à 225 kV et 20 lignes à 90 kV. L'occupation du sol est réduite pour une même capacité de transport.

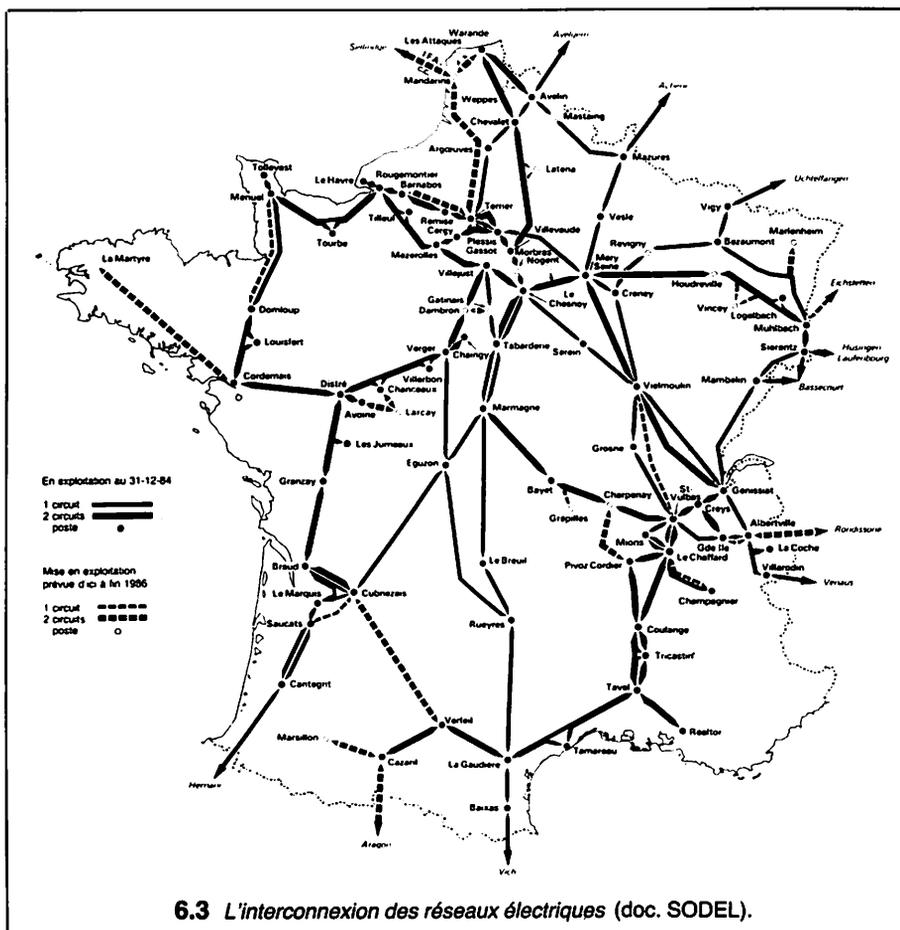
En préparation le futur niveau de tension est de 750 kV, déjà en service sur les longues lignes du Canada et des U.S.A.

## 2. L'INTERCONNEXION

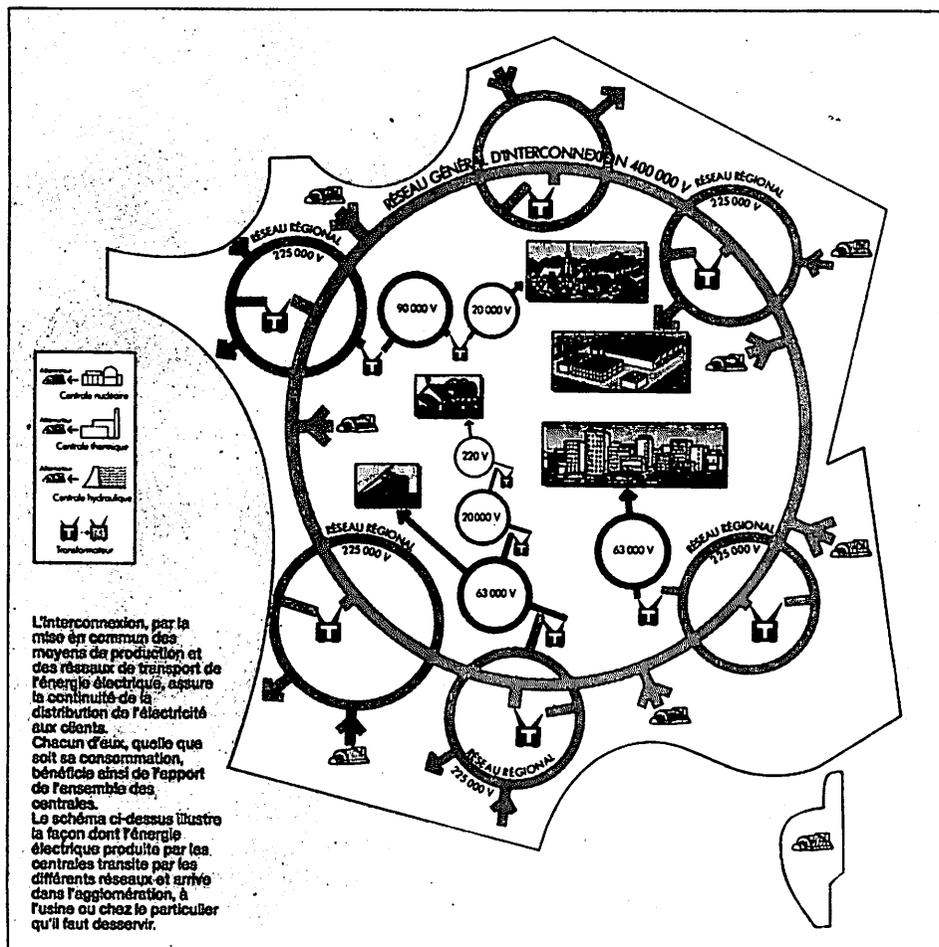
L'énergie électrique n'étant pas stockable il faut une adéquation permanente entre la production et la consommation. Le transport a une double obligation : acheminer l'énergie aux niveaux régionaux et collecter l'énergie produite par les différentes centrales.



6.1 Départ 20 kV/400 kV (Porcheville).



6.3 L'interconnexion des réseaux électriques (doc. SODEL).



6.2 Structure du réseau 400 000 volts (doc. SODEL).

Cette double obligation impose l'interconnexion, c'est-à-dire l'installation d'une sorte de maille à l'échelle de la France, sur laquelle se raccordent les lignes qui amènent le courant et celles qui le distribuent.

Grâce aux dispositifs de sectionnement de la maille, on peut faire face aux ruptures accidentelles des lignes et moduler selon les besoins, les débits d'énergie.

De plus des liaisons à l'échelle européenne permettent de faire transiter l'énergie entre notre réseau d'interconnexion et les réseaux des pays voisins. Ces liaisons ont un caractère d'import-export mais surtout elles permettent de faire face aux pointes d'appels de courant qui sont décalées d'un pays à l'autre (par exemple 18 h en Angleterre et 20 h en France) (fig. 6.2).

### 3. LES LIGNES HAUTE TENSION

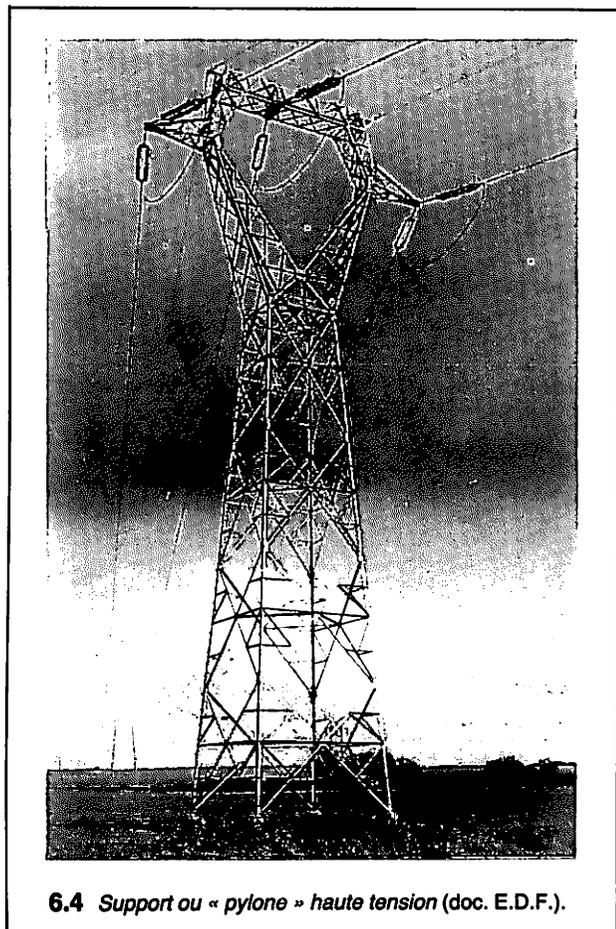
#### • Lignes aériennes (fig. 6.4)

Les lignes aériennes sont tracées à partir de bandes de 100 m de largeur au sol mais leur emprise réelle est de 70 à 80 m<sup>2</sup> tous les 500 m à chaque support. Le support est un poteau béton par exemple jusqu'à 63 kV et un pylône pour les tensions supérieures à plusieurs circuits. Ils appartiennent à différents types (Beaubourg, Trianon, Muguet). Ces lignes comportent en général deux circuits triphasés (deux ternes) et 2 câbles de garde placés au-dessus jouant le rôle de parafoudre.

Chaque conducteur de ligne est constitué de 1 ou 2 câbles associés suspendus à l'isolateur. Le câble est toronné (cuivre ou aluminium) sur une âme d'acier porteuse. L'isolateur est une chaîne de 14 à 19 éléments de 25 cm de diamètre dont la charge de rupture peut atteindre 15 tonnes.

Malgré une recherche esthétique pour les supports et un tracé le plus éloigné possible des centres urbains, l'impact d'une ligne T H T est très important. Les lignes aériennes ont un développement de :

- 9 000 km en 400 kV
- 21 000 km en 225 kV
- 40 000 km de 63 à 150 kV.



6.4 Support ou « pylône » haute tension (doc. E.D.F.).

Elles ont transporté  $245 \cdot 10^9$  kWh en 1980 avec 2,46 % de pertes. Les lignes moyennes et basses tension ont près de 1 million de kilomètres.

#### • Lignes souterraines

Les problèmes d'esthétique pourraient être résolus avec les lignes souterraines, malheureusement elles présentent de nombreux inconvénients :

- Pour un transport à 400 kV l'effet capacitif entre le câble et l'armature métallique devient considérable. Il existe une longueur critique au-delà de laquelle le courant ne passe plus (45 km en 400 kV).
- Elle est en moyenne 5 fois plus vulnérable et il est difficile de localiser le défaut.
- Le prix de revient est de 12 à 15 fois plus élevé et il faut neutraliser un passage de 5 m de largeur pour permettre les interventions.

La ligne souterraine est constituée d'un câble à un ou plusieurs conducteurs de cuivre à haute isolation. Le gradient de potentiel est de 5 000 V/mm pour une isolation au polyéthylène et de 9 000 V/mm pour les câbles à circulation d'huile. Il s'agit dans ce dernier cas d'un conducteur creux avec circulation d'huile fluide.

Les lignes de pénétration dans les centres urbains en 60 kV sont courantes.

#### • Lignes sous-marines

L'interconnexion avec l'Angleterre est assurée par la liaison I F A 2 d'une capacité de transport de 2 000 MW.

Cette liaison en courant continu est constituée par 8 câbles de 900 mm<sup>2</sup> de section de 45 km de longueur répartis en 4 paires posées sous 1,7 m de sédiments entre Folkestone et Sangatte.

Le courant subit une double conversion alternatif-continu (dans le câble) alternatif, dans les deux stations d'extrémité.

Des convertisseurs statiques à semi-conducteurs de puissance assurent le passage au courant continu pour son transit dans le câble ou sa transformation en courant triphasé à l'utilisation, et ceci dans les deux sens de l'échange.

#### 4. LES POSTES D'INTERCONNEXION (fig. 6.5)

Les postes d'interconnexion assurent la continuité ou la coupure aux différents nœuds de l'interconnexion.

Certains postes regroupent également des transformateurs ou des auto-transformateurs permettant le passage entre les paliers de tension (par exemple 225 kV/400 kV).

L'ouverture ou la fermeture d'un circuit est effectuée par un disjoncteur télécommandé de grande puissance (plusieurs milliers de kA) avec soufflage d'arc. Le transport en T H T n'a pu être résolu essentiellement qu'en raison des capacités de coupure et de fermeture des disjoncteurs (voir Tome 1 – thème 4).

Des études et recherches pour les transports à 1 million de volts passent par les essais de disjoncteurs à 1,5 million de volts et plus.

#### 5. LES MOUVEMENTS D'ÉNERGIE

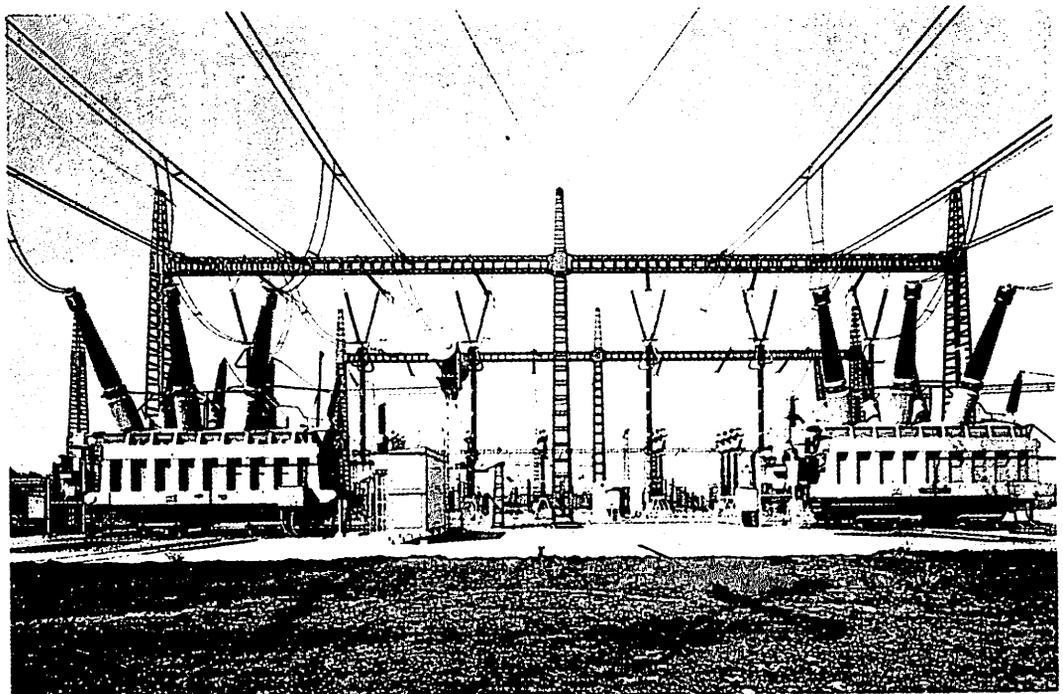
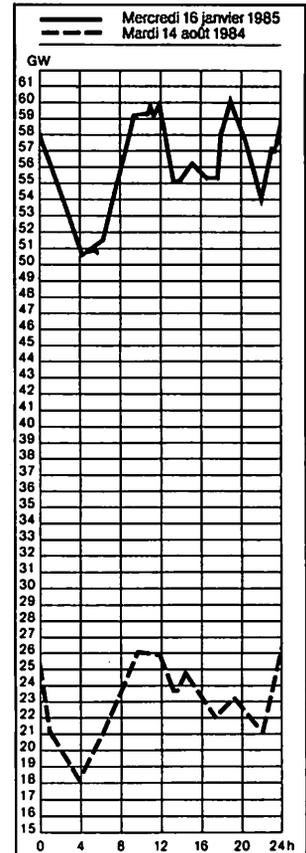
Le graphe fig. 6.6 montre la différence d'amplitude de la demande d'électricité lors de 2 journées extrêmes en janvier et en août.

La consommation est répartie en 3 catégories :

- Grande industrie alimentée en 63 kV et 225 kV dont le niveau de consommation est assez stable autour de 8 GW ( $8 \cdot 10^6$  kW).
- Industrie, commerce, collectivités en 15 kV et 20 kV dont l'évolution de la consommation est très variable.
- Clients basse tension dont la consommation est modulée en fonction de la saison et de l'heure avec des pointes importantes.

Pour faire face à ces variations, l'appel de courant tient compte de la disponibilité des différentes centrales, de leur temps de mise en route et du prix de revient de leur kWh. Cette gestion est assurée en temps réel par le Service des mouvements d'énergie.

6.6 Différences d'amplitudes extrêmes (janvier-août) (d'après E.D.F.).



6.5 Sous-tension d'interconnexion (doc. E.D.F.).

La figure 6.7 montre bien les taux de variation des différentes centrales. On remarque que les pointes sont « épongées » par une production à base d'hydraulique, de fioul et de gaz en dernier ressort.

Le maximum de puissance appelée se situe en janvier et dépasse 60 GW (1987).

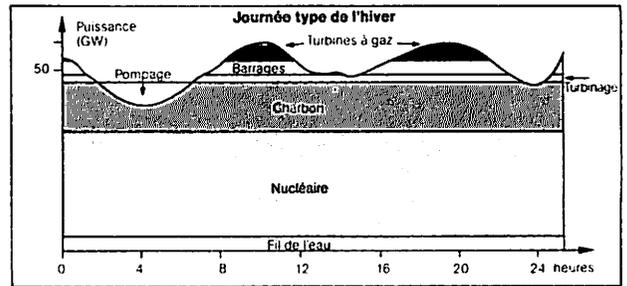
Le Service des mouvements d'énergie est structuré à partir d'un Service central qui élabore la politique et les méthodes d'exploitation (C N C E) et de huit centres C R C E de coordination de l'exploitation ou « dispatchings ».

L'ensemble gère en temps réel la production et le transport et les adaptent à la consommation. Cette gestion repose sur des données prévisionnelles annuelles hebdomadaires et journalières avec un ajustement 1/2 heure par 1/2 heure permettant de construire la courbe de charge du lendemain et d'établir le rôle des différentes installations.

Les informations acheminées vers les dispatchings sont traitées

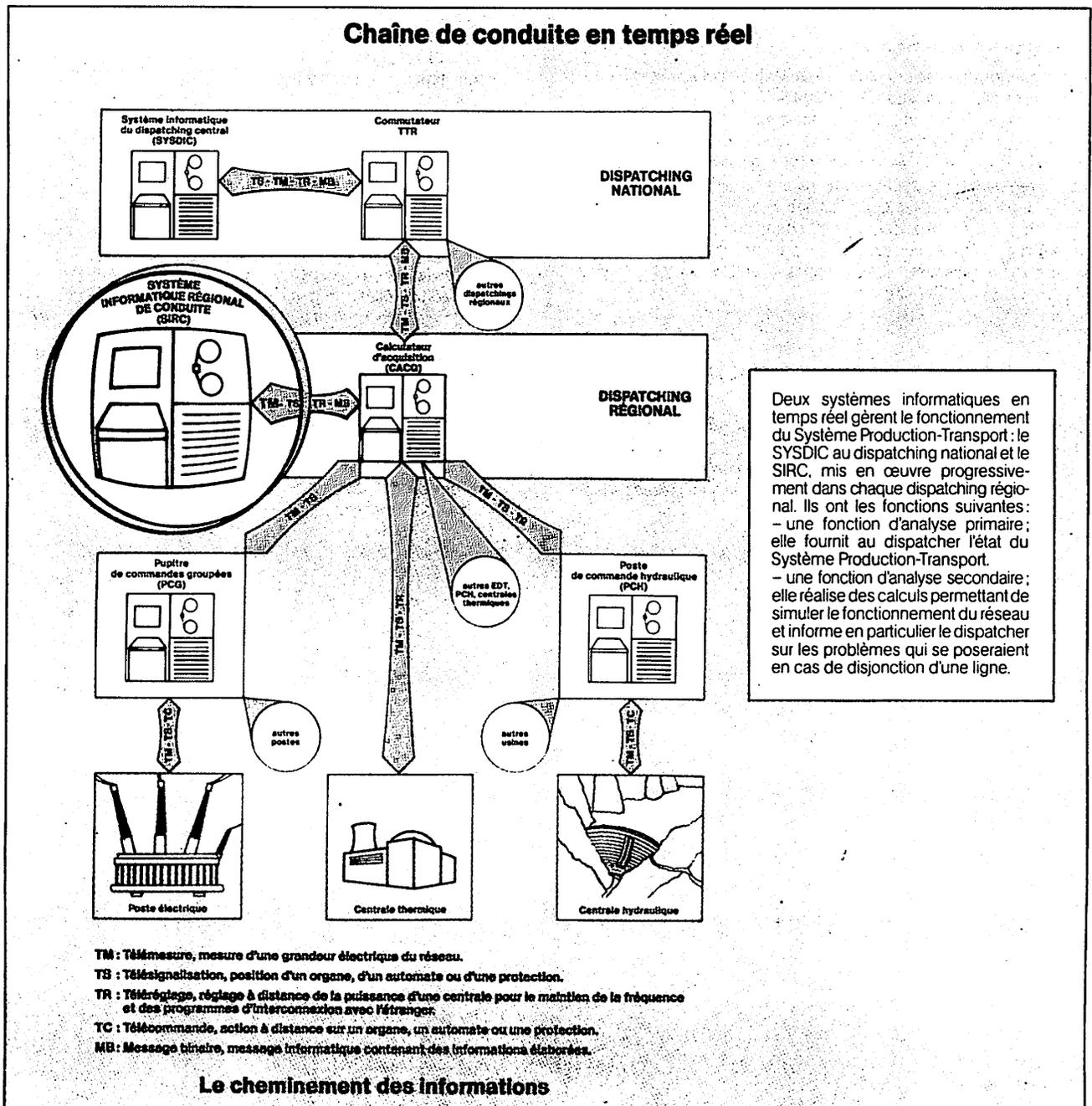
par un ordinateur qui peut simuler les valeurs de l'énergie et les incidences possibles.

Ces informations transmises par télémesures, téléseignalisations ainsi que les ordres qui en découlent apparaissent sur la figure 6.8.



6.7 Ordre de démarrage des différents moyens de production (d'après E.D.F.).

6.8 (doc. E.D.F.).



# 7. ÉNERGIES NOUVELLES

Ce vocable laisse à penser qu'il s'agit d'énergies récemment découvertes. Il n'en est rien puisque le soleil, le vent, les marées ont toujours donné lieu à de nombreuses installations productrices d'énergie.

En 63 avant J.-C. un moulin à eau entraînait une meule de pierre par l'intermédiaire d'un arbre vertical dans le palais de Mithridate. Les romains avaient construit près d'Arles un moulin à eau alimenté par un aqueduc qui pouvait moudre 28 tonnes de blé en 10 heures. A partir de 1180, les moulins à vent à pivot central sont très nombreux en France, Angleterre et Hollande. Le moulin à marée existait en 1044 dans les lagunes au nord de l'Adriatique.

Ce sont les moyens d'exploiter ces énergies qui sont à l'heure actuelle reconsidérés à la faveur des développements technologiques.

Nous ne nous intéresserons qu'aux énergies donnant lieu à production d'électricité ou dont la conversion fait appel à l'électricité. La chaîne de production comporte à partir de l'énergie primaire, un convertisseur, un moyen de stockage, une installation de distribution (fig. 7.1).

La plupart de ces dispositifs sont de puissance limitée aux besoins individuels ou aux besoins d'une petite collectivité. Leur débit est aléatoire dans le temps, la saison et les conditions locales : autant de facteurs peu compatibles avec l'autonomie de production d'énergie. De plus le rendement global est gravement affecté par le système accumulateur d'énergie.

## 1. ÉNERGIE SOLAIRE

La puissance rayonnée par le soleil est d'environ 1 400 W/m<sup>2</sup> avec une disponibilité qui varie : avec les heures de jour et de nuit donnant une moyenne de 160 W/m<sup>2</sup> au niveau du sol, avec les sites (2 200 kWh au Sahara en moyenne par an et 1 000 kWh dans le Nord).

La durée d'ensoleillement est un facteur important. Elle varie pour la France entre 1 750 et 3 000 heures par an.

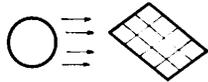
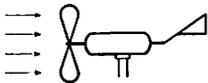
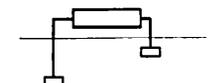
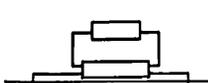
### • Nature et capture du rayonnement solaire

C'est un rayonnement dans le spectre visible par l'œil humain et dans l'infrarouge compris entre 0,3 et 3 μm.

Ce rayonnement est absorbé partiellement par les surfaces foncées (noir, bleu, etc.) ou réémis à une longueur d'onde supérieure 4 à 30 μm.

Toutes les techniques de capture du rayonnement solaire consistent à disposer un élément à chauffer sous forme de « corps noir » et à piéger le retour inverse de ce rayonnement. Une lame de verre placée devant l'élément a un indice de réfraction suffisant pour s'opposer au renvoi du rayonnement à l'extérieur : c'est l'effet de serre.

7.1

ÉNERGIE	FORME PRIMAIRE	CONVERTISSEUR	ÉNERGIE PRODUITE	STOCKAGE	UTILISATION
 <p><b>solaire</b></p>	<p>Rayonnement</p> <p>Chaleur</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cellules photo-voltaïques</li> <li>Cycle thermodynamique = fluide - vapeur - turbine</li> </ul>	<p>Électrique</p> <p>Électrique</p>	<p>Accumulateur</p> <p>Pas de stockage</p>	<p>Eclairage. Balisage. Force motrice. Transmissions.</p> <p>Emissions hertziennes</p>
 <p><b>éolienne</b></p>	<p>Vent = différences de pressions atmosphériques</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Moulins à hélice, à pales</li> <li>Panémone</li> <li>Hélice de Darrieus</li> </ul>	<p>Mécanique ou Électrique</p>	<p>Accumulateur</p> <p>Electrolyse de l'eau = H<sub>2</sub></p>	<p>Eclairage. Chauffage par accumulation</p> <p>Force motrice</p>
 <p><b>thermique (des mers)</b></p>	<p>Chaleur = différences de température des eaux</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cycle thermodynamique fluide - vapeur - turbine</li> </ul>	<p>Électrique</p>	<p>Pas de stockage</p>	<p>Couplage sur le réseau électrique</p>
 <p><b>hydraulique (des mers)</b></p>	<p>Marée (flux et reflux)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Turbine hydraulique</li> </ul>	<p>Électrique</p>	<p>Pas de stockage</p>	<p>Couplage sur le réseau électrique</p>
 <p><b>Géothermie</b></p>	<p>Chaleur</p> <p>Différence de température</p> <p>Air - Eau</p> <p>Eau - Eau</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pompe à chaleur avec fluide frigorigène</li> </ul>	<p>Chaleur</p>	<p>Pas de stockage</p>	<p>Chauffage individuel ou collectif</p>

## ● Capteurs

Le capteur le plus simple est un réservoir plan de faible épaisseur (quelques cm) à fond noir à couvercle de verre dans lequel circule par convection l'eau ou l'air à chauffer.

La température du fond absorbant peut atteindre 100 °C l'eau, 60 °C et un tel capteur fournit 800 à 1 600 kWh par m<sup>2</sup> et par an.

Le meilleur rendement est obtenu quand le plan du capteur est normal au rayonnement solaire.

## 2. CAPTEUR PHOTOVOLTAÏQUE

Le capteur est composé d'une association de cellules photovoltaïques au silicium – on dit aussi des photo-piles. La conversion du rayonnement solaire en énergie électrique est directe.

### ● Principe de fonctionnement (fig. 7.2)

Les photons transportés par le rayonnement solaire communiquent aux électrons une énergie suffisante pour les libérer de l'atome au niveau de la jonction. La migration d'électrons donne un courant qui est capté par une grille conductrice.

La différence de potentiel apparaît entre grilles qui sont constituées en réseaux parallèles et la couche conductrice à la face arrière de la cellule (0,4 à 0,6 V).

La réponse spectrale de la cellule solaire au silicium ou plage d'utilisation efficace du rayonnement solaire est comprise entre 0,35 et 1,1 μm.

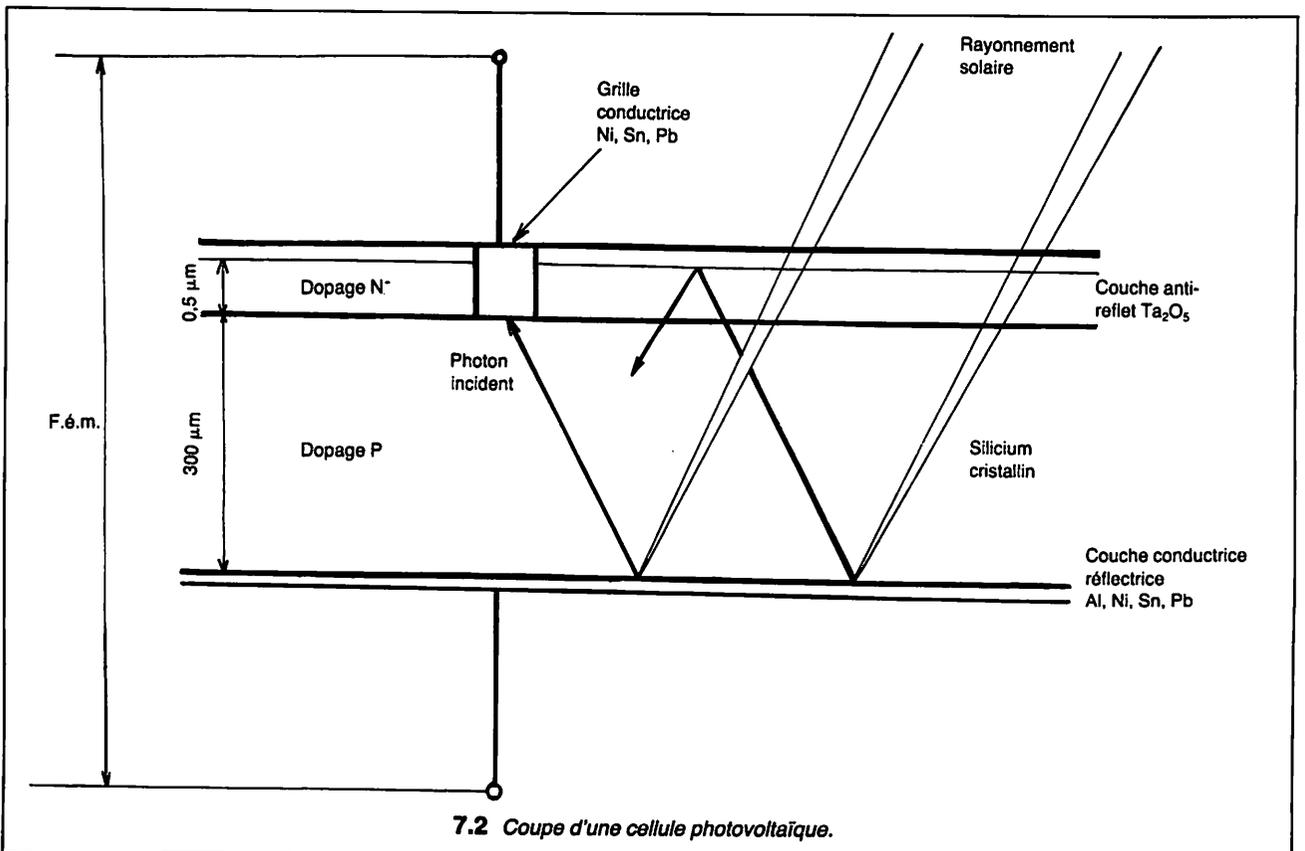
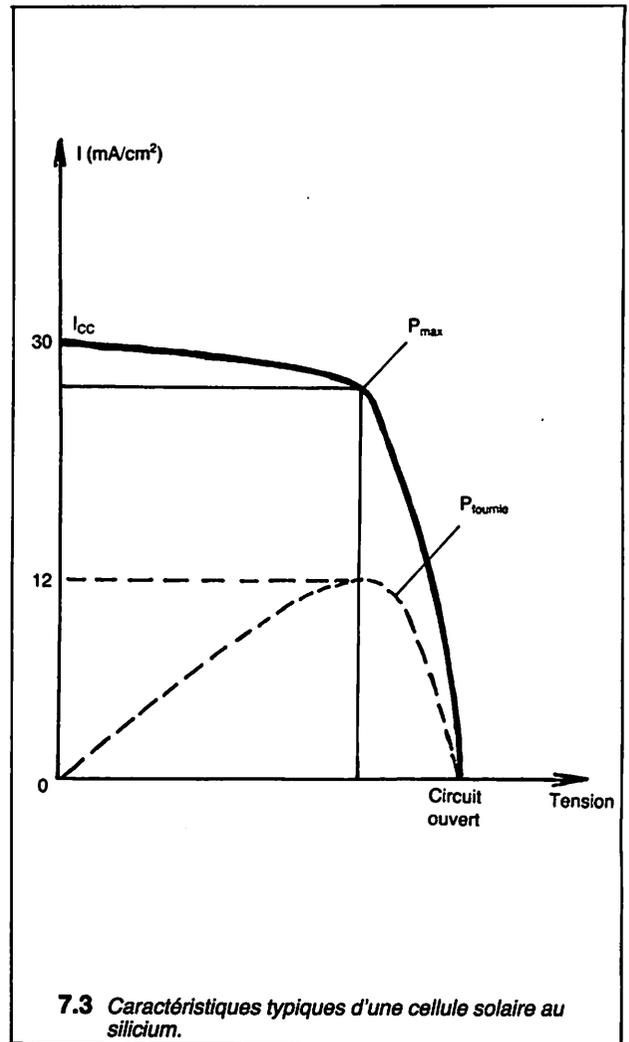
Son rendement théorique est de 22 %. Actuellement il atteint dans les réalisations industrielles 12 %. Les cellules à l'arséniure de gallium (plus coûteuses) donneraient 26 %.

### ● Courbe de charge (fig. 7.3)

Les caractéristiques moyennes d'une cellule au silicium sont données par le graphe courant de tension. Le facteur de forme =

$\frac{P_{max}}{I_{cc} \times U_0}$  est de l'ordre de 70 %. La puissance crête est définie pour

un éclairage de 1 kW/m<sup>2</sup>, un rayonnement dit AM 1,5 (incliné à 45° par rapport au sol) avec une température de la cellule de 25 °C.



● **Modules et panneaux solaires**

Les cellules de forme circulaire sont encapsulées sous verre trempé à l'avant et résine silicone à l'arrière (fig. 7.4). Elles sont associées en modules connectés en série parallèle pour obtenir des valeurs compatibles avec les accumulateurs 6, 12, 24 V. Par exemple 12 V avec 32 à 36 cellules selon l'éclairement.

Les modules sont assemblés en panneaux qui sont positionnés pour capter au mieux le rayonnement solaire à la latitude d'installation.

Un panneau R.T.C. BPX 47 C comporte 36 cellules de 100 mm de diamètre. Il délivre jusqu'à 33 W sous 16,5 V (2 ampères) à 25 °C de température de jonction (fig. 7.5).

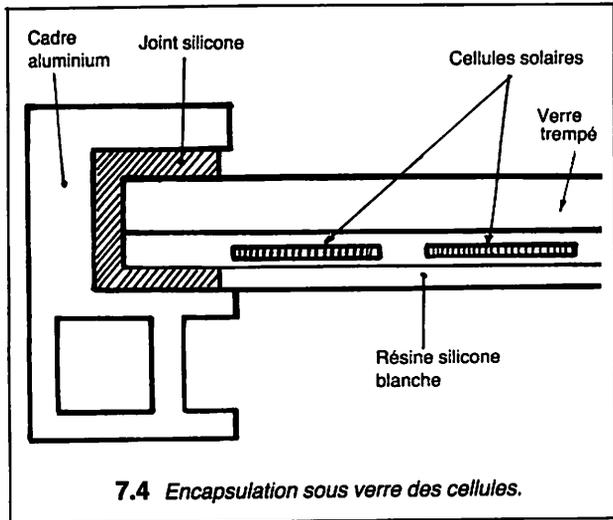
Le module France Photon comporte 34 cellules de 33 à 40 W donnant 17,4 V sous 2,38 A avec un ensoleillement de 1 000 W/m<sup>2</sup> (fig. 7.6).

● **Applications**

Cette production d'énergie électrique est onéreuse (le kWh installé revient 100 fois plus cher que le kW thermique traditionnel) mais donne lieu déjà à de nombreuses applications :

**Stations fixes** ou isolées pour alimenter des relais hertziens ou des réémetteurs T.V., balises marines ou terrestres, charge de batteries sur les bateaux, etc.

L'émetteur T.V. SAT satellisé en orbite géostationnaire dispose de panneaux délivrant 55 kW. L'énergie massique est de 25 W/kg pour une durée de vie de 7 ans.



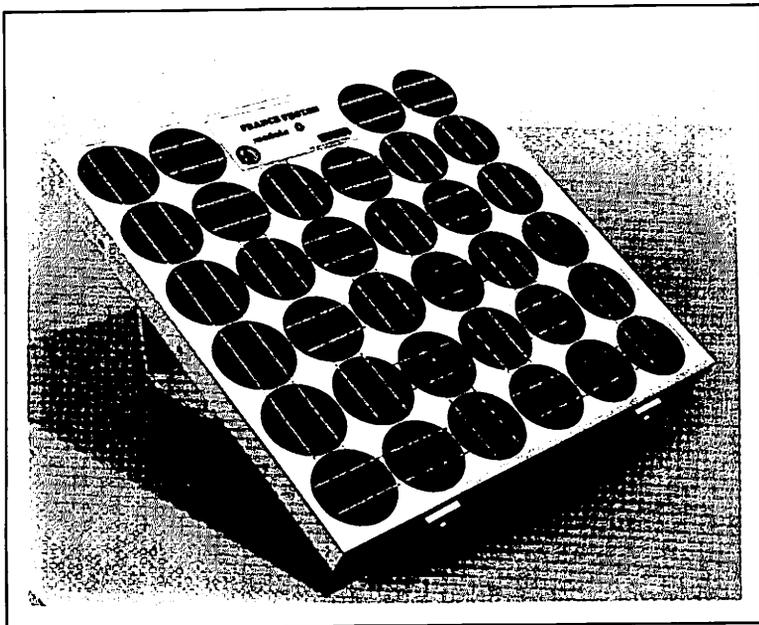
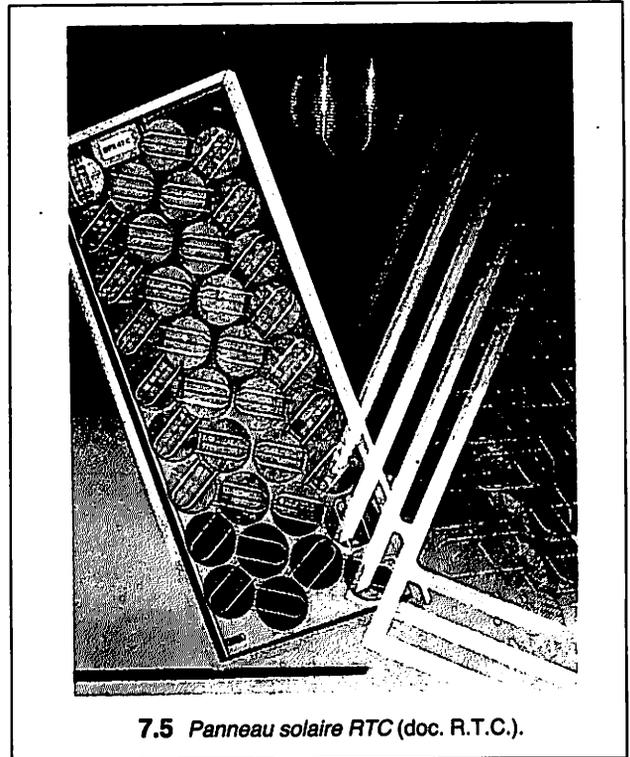
**Stations de pompage.**

En associant un certain nombre de panneaux solaires on dispose d'une puissance de quelques kW. Le moteur électrique à haut rendement (moteur continu à aimants permanents ou moteur synchrone auto-piloté) entraîne une pompe centrifuge qui fonctionne 8 à 10 heures par jour. Dans des pays comme le Mali des installations de 25 m<sup>2</sup> de panneaux solaires, une pompe avec moteur de 1 300 W, donnent avec 20 m de H M T 50 m<sup>3</sup> d'eau par jour. L'entretien de l'ensemble est pratiquement nul.

● **Batteries d'accumulateurs**

Des batteries d'accumulateurs au plomb ou au cadmium nickel peuvent stocker l'énergie électrique. Un circuit régulateur de charge et une diode anti-retour sont placés entre les panneaux de cellule et les batteries.

La capacité des batteries est définie en fonction des besoins nocturnes et du courant débité par les cellules.

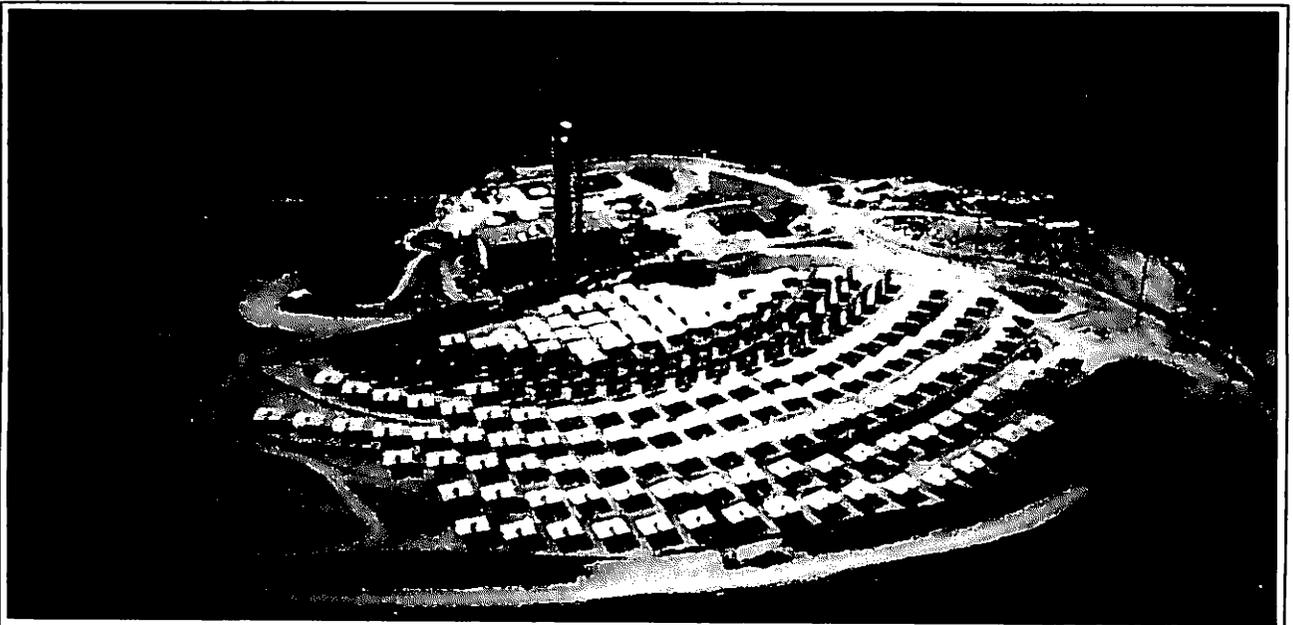


### 3. CENTRALE ÉLECTRIQUE THÉMIS

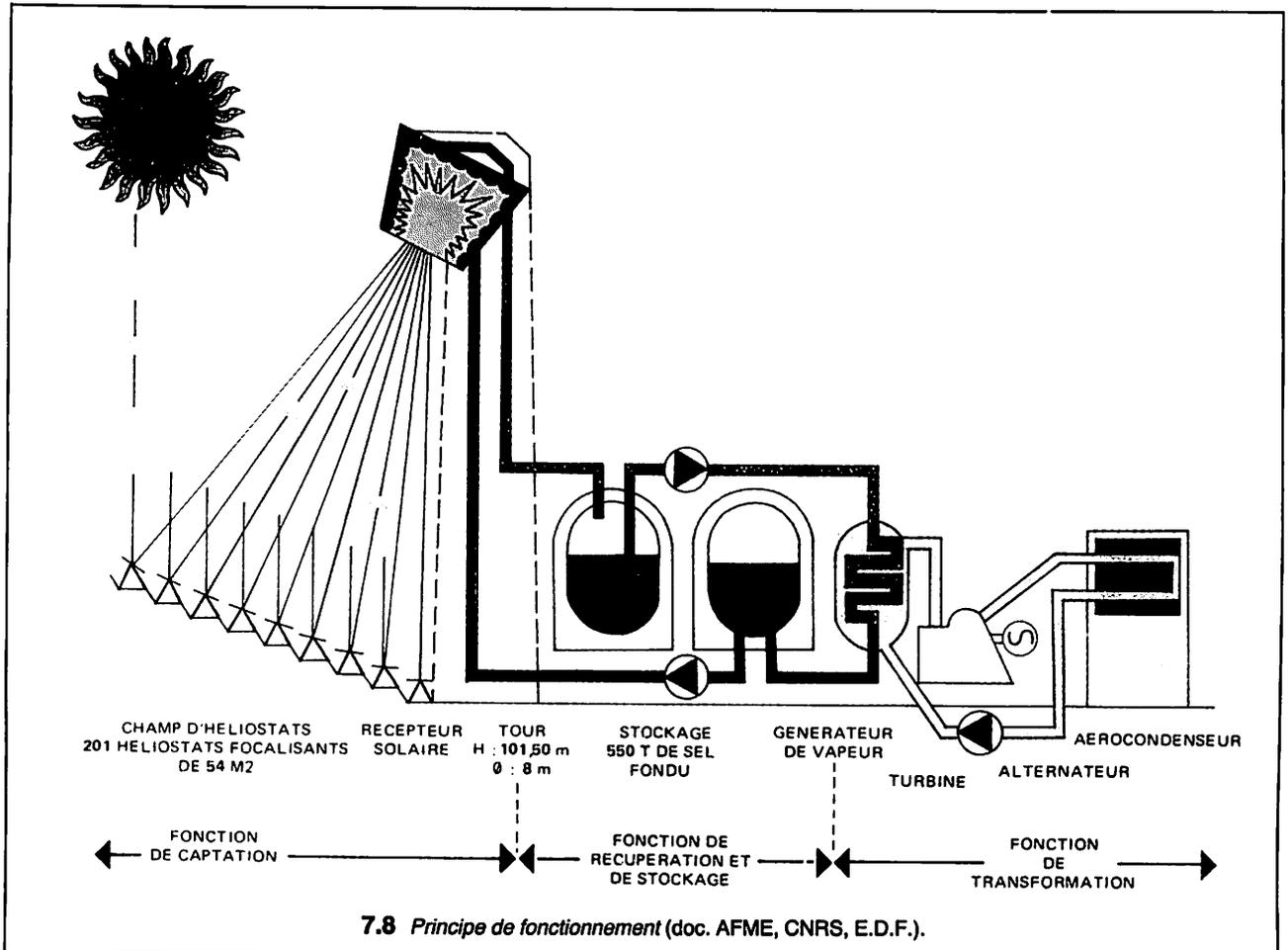
La seule réalisation à l'échelle industrielle en France est la centrale d'Odeillo (Pyrénées-Orientales) : THÉMIS (fig. 7.7).  
L'ensoleillement moyen de cette région (2 400 heures par an) et une énergie solaire maximale de 1 040 W/m<sup>2</sup> constituaient des facteurs très favorables à cette installation.

#### 1° PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT (fig. 7.8)

Les rayons solaires sont réfléchis par des miroirs et renvoyés sur une chaudière installée dans une tour.  
Cette chaudière contient du sel fondu qui joue le rôle de fluide caloporteur. Un échangeur reçoit le sel fondu à haute température et produit de la vapeur qui est utilisée dans un cycle thermodynamique classique, pour entraîner un alternateur.



7.7 Centrales Thémis : vue générale depuis le Nord-Est.



7.8 Principe de fonctionnement (doc. AFME, CNRS, E.D.F.).

● **Les capteurs** (fig. 7.9)

201 capteurs ou héliostats THEM de 53,7 m<sup>2</sup> de surface unitaire (10 740 m<sup>2</sup> au total) captent les rayons solaires et les réfléchissent vers la chaudière. Ces héliostats sont orientés et asservis à la trajectoire du soleil (à 2,2 milliradians près) par des moteurs de positionnement.

Par ailleurs 11 héliostats THEK de forme paraboloidale de 75 m<sup>2</sup> chauffent un réservoir de 80 m<sup>3</sup> pour maintenir le sel à + 200 °C et préchauffent l'eau alimentaire de la turbine.

● **La chaudière**

C'est un récepteur des rayons solaires réfléchis, d'un volume de 56 m<sup>3</sup> elle est installée au sommet d'une tour à environ 80 m de hauteur (fig. 7.10). La surface d'échange ou surface d'insolation est de 110 m<sup>2</sup>. Elle est inclinée à 30° sur l'axe horizontal. La température du sel est 250 °C à l'entrée et de 450 °C à la sortie. La température de la vapeur dans l'échangeur sera portée à 430 °C sous une pression de 40 bars.

La puissance thermique nominale de la chaudière est de 9 000 kW.

● **Réservoir de stockage**

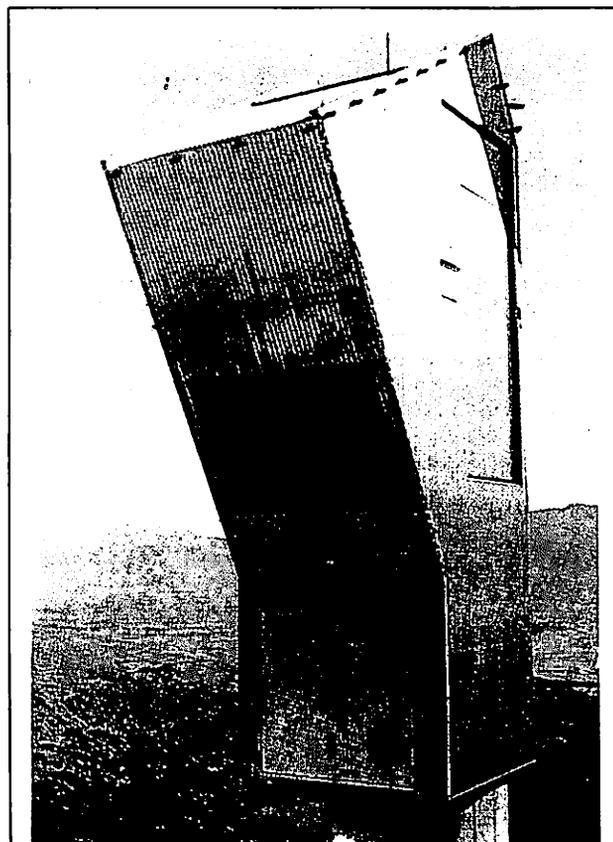
Le fluide caloporteur (mélange de nitrite, nitrate de sodium et de potassium) d'une masse de 550 tonnes est stocké au bas de l'usine dans un réservoir qui constitue un volant thermique de 40 000 kWh soit environ 5 h d'ensoleillement.

● **Groupe turbo-alternateur**

A partir d'une puissance thermique initiale de 9 000 kW et avec un rendement de 0,28 l'alternateur débite approximativement  $9\ 000 \times 0,28 = 2\ 500$  kW. La puissance absorbée par les auxiliaires est de 200 kW.

3. PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

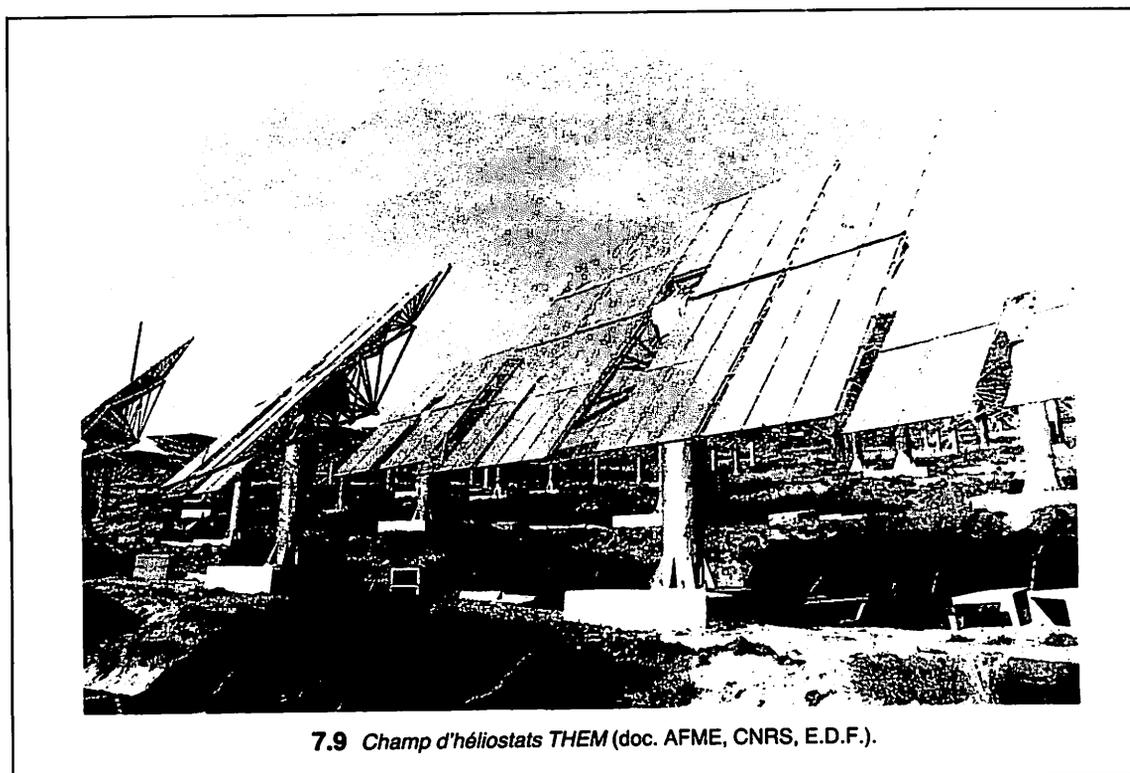
Avec 2 400 heures d'ensoleillement moyen annuel, l'énergie solaire reçue est de 18,26 GWh thermiques. Le rendement énergétique est de 0,16 et l'énergie électrique produite par la centrale en un an est d'environ 3 GWh (3 millions de kWh) ce qui lui donne un rendement moyen annuel de 0,16.



7.10 Tour du récepteur solaire porte-récepteur Cible passive (doc. AFME, CNRS, E.D.F.).

Avec une durée de vie de 20 ans et un investissement de 300 MF (1983) le prix du kWh ressort environ à 5 F (plus de 20 fois le kWh des centrales classiques).

Ce programme s'est cependant révélé intéressant dans la mesure où il a permis d'acquérir des données indispensables pour la construction des centrales futures dans des lieux encore plus favorables (Afrique, Amérique du Sud...).



7.9 Champ d'héliostats THEM (doc. AFME, CNRS, E.D.F.).

#### 4. ÉNERGIE ÉOLIENNE (fig. 7.11)

Le vent est un phénomène lié aux différences de température des masses d'air. Dans sa rotation journalière la Terre expose l'atmosphère aux rayons solaires d'où l'apparition d'une source chaude, ou inversement cache ces rayons et crée une source froide. Ce cycle thermique donne naissance à une énergie cinétique : le vent.

En réalité les phénomènes sont très complexes et sont liés à la latitude, aux phénomènes météorologiques, aux transitions entre les océans et les continents et aux reliefs montagneux. Le vent est donc un phénomène irrégulier, mais pour un site donné, l'énergie annuelle est à peu près constante, avec en général des pointes d'hiver doubles de celles de l'été (en Europe).

La prospection et la mesure par des anémomètres ont permis de dresser une carte des vents en France. Les sites privilégiés sont en zone côtière ou dans des régions montagneuses. L'énergie brute dépasse 3 000 kWh/m<sup>2</sup> et par an dans ces régions.

##### 1° PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT DES ÉOLIENNES

La courbe figure 7.12 donne la pression de l'air en fonction de la vitesse du vent en m/s ou degrés Beaufort. L'étude de Betz (fig. 7.13) montre que l'hélice, comprise entre la veine de section  $S_1$  en AB et  $S_2$  en CD transforme la vitesse du vent  $V_1$  en vitesse  $V_2$  donc son énergie cinétique en énergie mécanique.

$$S_1 V_1 = S_2 V_2$$

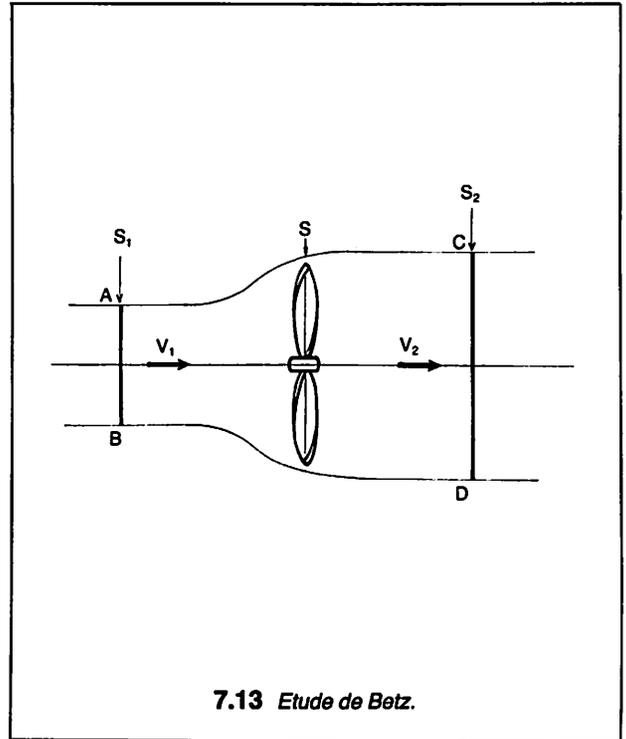
On démontre que :

$$P_{\max} = 0,37 S V_1^3$$

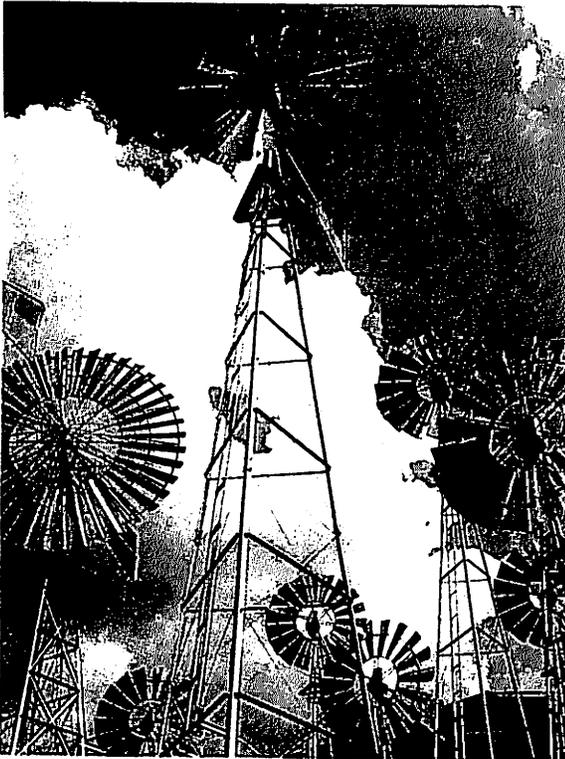
| S est la surface balayée par l'hélice  
| V<sub>1</sub> la vitesse initiale du vent.

Les meilleurs aéromoteurs développent une puissance de l'ordre de 60 à 70 % de la puissance théorique ci-dessus.

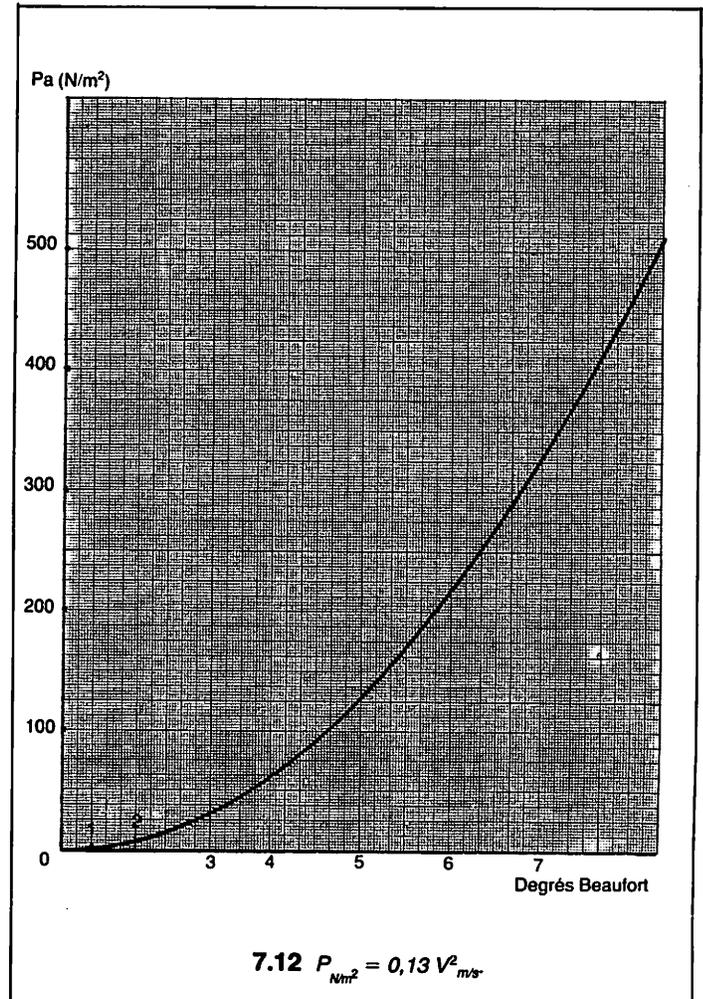
Le tableau page ci-contre donne la puissance probable d'une éolienne pour des vents de 7 m/s et 10 m/s en fonction du diamètre de l'hélice en mètre.



7.13 Etude de Betz.



7.11 L'énergie éolienne (doc. SODEL).



7.12  $P_{N/m^2} = 0,13 V^2_{m/s}$

Diamètre de l'hélice en m	Vent de 7 m/s		Vent de 10 m/s	
	Vitesse de rotation en tr/min	Puissance en kW	Vitesse de rotation en tr/min	Puissance en kW
1	935	0,07	1 340	0,2
2	470	0,27	670	0,8
3	310	0,60	450	1,8
4	235	1,07	355	3,2
5	190	1,7	270	5
6	155	2,4	220	7,2
8	120	4,4	168	12,8
10	95	6,7	134	20

Ces puissances obtenues avec des éoliennes bipales rapides à axe horizontal doivent tenir compte du fait que leur démarrage exige des vitesses du vent relativement élevé (5 m/s).

## 2° DIFFÉRENTS TYPES D'AÉROMOTEURS

### • Classement des aéromoteurs

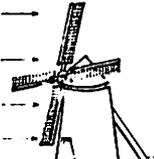
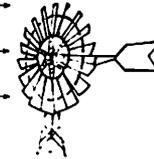
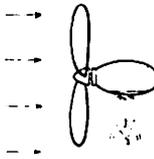
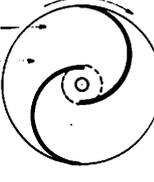
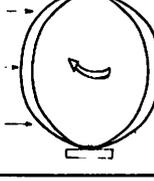
On peut classer les aéromoteurs selon le tableau (fig. 7.14).

Les deux grandes familles étant les machines à axe horizontal ou à axe vertical. Les éoliennes à axe horizontal qui dérivent des anciens moulins sont les plus répandues. Leur orientation face au vent est assurée par une dérive ou une hélice secondaire normale à hélice principale.

La régulation de la vitesse de rotation résulte du pas variable de l'hélice ou s'obtient par servomoteur, par ailerons centrifuges, etc.

### • Construction des aéromoteurs

L'hélice est généralement en alliage d'aluminium ou de plus en plus en matériaux composites : résine polyester – fibre de verre ou élastomère – carbone. La vitesse de rotation impose en général un train d'engrenages multiplicateur. Les problèmes essentiels se situent au niveau de la régulation des pales et de l'ancrage du pylône porteur.

7.14 Différents types d'aéromoteurs.			Diamètre en m	Vitesse tr/min	Puissance	Formes
<b>Eolienne à axe horizontal</b>	Moulin à vent	A toit ou bâti orientable Hélice 2 ou 4 pales	5 à 15	10 à 40	$0,15 D^2 V^3$	
	Eolienne lente	Multipales (12 à 24)	5 à 8	10 à 50	$0,15 D^2 V^3$	
	Eolienne rapide	2, 3 ou 4 pales	2 à 30	20 à 1200	$0,20 D^2 V^3$	
<b>Eolienne à axe vertical</b>	Panénone	4 aubes 1/2 cylindriques	2	10 à 20	$0,15 \text{ à } 0,18 S V^3$	
	Rotor de Savonius	2 aubes 1/2 cylindriques	2 hauteur 4 m	10 à 20	$d^3$	
	Rotor de Darrieus	Pales biconvexes	3 à 6	10 à 250	jusqu'à $0,35 S V^3$	

**D** : diamètre de l'hélice ; **V** : vitesse du vent en m/s ; **S** : surface ou section de la veine d'air en m<sup>2</sup>

### 3° UTILISATION DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

On peut classer les différentes utilisations de l'énergie éolienne :

#### ● **Pompage de l'eau**

Par éolienne à faible vitesse avec une transmission bielle-manivelle et une pompe à piston.

#### ● **Production directe de chaleur**

Par un convertisseur hydraulique.

Ce convertisseur est une sorte de turbine à huile analogue aux convertisseurs de couple utilisés dans les transmissions hydrauliques. La chaleur dégagée est acheminée dans un échangeur - accumulateur d'eau chaude de grand volume (20 m<sup>3</sup> pour une habitation).

#### ● **Production d'énergie électrique**

L'éolienne entraîne l'alternateur par un train d'engrenages. L'alternateur est choisi de préférence à une génératrice à courant continu : il débite à partir de vitesses plus faibles et sa construction, notamment avec inducteur à aimants permanents, le rend beaucoup plus fiable.

Le courant peut être utilisé :

- Directement pour un chauffage par accumulation.
- Après redressement par semi-conducteurs pour charger des accumulateurs.
- Pour produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau (additionnée de sel pour la rendre meilleure conductrice). Le courant moyen est de l'ordre de 200 A/m<sup>2</sup> d'électrodes.

L'hydrogène naissant peut être absorbé par des éponges métalliques : hydrure de vanadium ou de magnésium et libéré ensuite par élévation de température de ces supports. Ce processus n'est pas encore parfaitement maîtrisé, mais constitue un remarquable moyen d'accumulation de l'énergie.

### 4° CARACTÉRISTIQUES DE GROUPES AÉROMOTEURS ÉLECTRIQUES

#### ● **Éoliennes de petites puissances (en France)**

**AEROWATT** fabrique des éoliennes de 24 à 4 000 watts.

Exemple : 1 100 FPS Régime nominal pour des vents compris entre 3 et 6 m/s.

Hélice bipale de 9,20 m de diamètre.

Vitesse 183 tr/min.

Puissance nominale 1 125 W.

Tension 220/380 V.

**ENAG** éoliennes de 650 à 3 000 W.

Exemple : Pour un vent de 9 m/s.

Hélice tripale de 4,40 m de diamètre.

Puissance nominale 3 000 W.

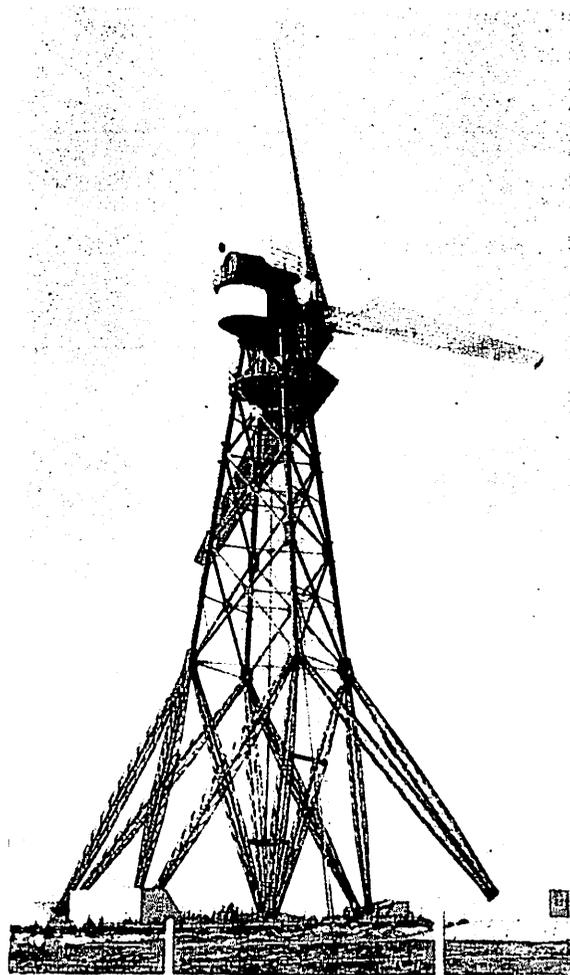
Tension continue 110 V.

#### ● **Éoliennes de grandes puissances**

EDF a expérimenté de nombreux prototypes.

**Aérogénérateur Neyrpic** de 1 000 kW pour un vent de 60 km/h à St-Rémy-des-Landes (Manche) (fig. 7.15). L'hélice tripale de 35 m entraînait un alternateur synchrone 1 015 tr/min donnant une tension de 3 000 V.

D'autres projets (Nogent-le-Roi) n'ont pas eu de suite en raison de l'importance des investissements (environ 5 000 F par kW installé).



7.15 Éolienne de grande puissance.

## APPENDICE : LES DÉCOUVERTES RELATIVES A L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

1896	Becquerel	: Rayonnement de l'uranium.
1897	Thomson	: Découverte de l'électron.
1898	P. et M. Curie	: Radio éléments : polonium, radium.
1903	Rutherford	: Théorie des réactions nucléaires.
1905	Einstein	: Équivalence masse – énergie $E = m c^2$ .
1913	Bohr	: Premier modèle de l'atome.
1930	Bothe, Becker Chadwich	: Découverte du neutron.
	I. et J. Joliot-Curie	
1934	I. et J. Joliot-Curie	: Radioactivité artificielle.
1938	Hahn, Strassmann	: Fission des atomes lourds.
1939	Joliot-Curie Kowarski	: Réaction en chaîne et production d'énergie nucléaire.
1942	Fermi	: Première pile atomique (U.S.A.).
1948		: Première pile atomique française.
1956		: Première centrale nucléaire française Marcoule 5 MW.
1973		: Première centrale à neutrons rapides Phénix 250 MW.
1985		: Super Phénix 1 250 MW.

# INDEX ALPHABÉTIQUE

## a

accumulateur	119
aéromoteur	233
aimants	134
automate	66
alternateur	220
ampères-tours (calcul)	58
analogique (système)	15
arc polaire	21
atome	204

## b

balais et porte-balais	102
ballon fluorescent	70
bilan des puissances	35
binaire	15
bobine	20
bombardement électronique	180

## c

canalisation préfabriquée	80
capacité d'accumulateurs	119
capteur d'accélération	165
capteur de couple	167
capteur de déplacement	127
capteur de force	166
capteur héliostat	231
capteur de niveau	48
capteur photovoltaïque	228
capteur de pression	49
capteur de vitesse angulaire	165
capteur linéaire	163
caractéristiques électromécaniques	36
cascade hyposynchrone	64
centrale nucléaire	211
centrale solaire	230
champ glissant	19
chaudière	202
circuit de commande	49
circuit équivalent	33
circuit magnétique	25
circuit de puissance	49
classe d'isolation	36
codeur	130
collecteur	102, 111
commutation	110

condenseur	203
contacteur disjoncteur	45
contacts méca-thermiques	41
contrôleur d'isolement	89
coupe circuit à fusibles	43
couple moteur	36
couple résistant	17
couple rotorique	34
courbe de sécurité	82
courant magnétisant	30
cycle thermique	201
cycloconvertisseur	145

## d

décalage des phases	22
D <sup>2</sup> L (puissance d'une carcasse)	28
démarrage d'un moteur	32
démarrage (rotor bobiné)	58
démarrage (temps de)	38
démarreurs	59
densité linéique	30
détecteur à action mécanique	123
détecteur capacitif	126
détecteur à effet Hall	127
détecteur inductif	124
détecteur à variation de résistivité	49
diagramme du cercle (U.T.E.)	60
disjoncteur	44
dynamo tachymétrique	164

## e

énergie (unités)	194
énergie nucléaire	205
énergie solaire	227
enroulement compensateur	112
enroulement imbriqué	106
enroulement ondulé	106
entrefer	29
essai à vide	63
en charge	63
en court-circuit	63
éolienne	232
excitation de l'alternateur	222

## f

fabrication (moteurs)	24, 55
facteur de bobinage	27
facteur d'utilisation	77
faisceau	20
f. é. m. statorique	27
fertile (élément)	207
fissile (élément)	207
filoguidage	99
fonctionnement cyclique	32
force d'attraction	46
freinage	39, 117
fusion thermonucléaire	209

## g

générateur d'impulsion	163
gradateur	149

## h

hacheur	113
hauteur manométrique totale HMT	12
hystérésis (chauffage)	191

## i

imprégnation du stator	26
induction (chauffage)	189
induction (circuit magnétique)	29
interconnexion	223
interfaces	66
isolation du stator	26

## l

laser	182
lampes à décharge	69
lampes aux iodures métalliques	72
lampes à lumière mixte	71
lampes de substitution	75
lampes à vapeur de sodium	73
lignes aériennes	224
lignes haute tension	223
lignes sous marines	225
lignes souterraines	225
limiteur de surtension	88
logique ET	49
luminescence	69

## m

manipulateur	159
mètre colonne d'eau (mCe)	12
moteur à aimant	135
moteur cloche	137
moteur couple toroïdal	138
moteur à courant continu classique	102
moteur discoïdal	136
moteur frein	40
moteur pas-à-pas	153
moteur synchrone autopiloté	151
mouvements d'énergie	226

## o

onduleur	64
onduleur autonome	145

## p

pascal	12
pas polaire	21
panneau solaire	229
pertes (moteur asynchrone)	34
pertes fer	58
pertes séparées	35
plaque à bornes	24
pôles bobinés	21
pôles conséquents	21
pompes	16
pompe alimentaire	203
pression	12
protection interne	41
protection externe	41
puissance rotorique	34

## r

radioactivité	205
réaction de fission	206
réacteur nucléaire	212
redresseur	64, 139
régime de neutre	82
régime TT	82
régime IT	85
régime TN	83
règle frange Moire	130
règle inductosyn	131
régimes de marche	37
relais (notion)	45
relais magnétique	47

relais thermique	46
résolver	129
rhéostat de démarrage	60
robot	169
rotor	18
rotor bobiné	19, 54
rotor en court-circuit	19
rotor à bagues	56

## S

schémas (panoramique et frontal)	20
schéma panoramique stator	55
schéma panoramique rotor	56
section	20
sélectivité	91
semi-conducteur C.T.P.	41
soudage à l'arc	185
soudage par bossage	178
soudage en bout	179
soudage à la molette	178
soudage par résistances par points	171
spire de Fraeger	46
spires (nombre au stator)	28
stator	18
stator minimum	23
super phénix (Centrale)	219
surintensité	42

surrégénérateur	216
système automatisé	48

## t

temps de coupure	43
temps de réponse d'une protection	91
thermodynamique	200
thyristor (commande)	65
tout ou rien	15
transformateur de soudage	175
tube luminescent	76
turbine	196, 198
type de service	142

## u

usine hydraulique	196
uranium (technologie)	208

## v

vitesse de rotation	50
---------------------	----

# TABLE DE CIRCULATION

L'organisation donnée à l'ouvrage permet de multiplier les modes de circulation en prenant appui sur les nombreuses **pages d'orientation** :

<b>LISTE DES THÈMES</b> .....	<b>5</b>
<i>Pour une présentation rapide de l'ensemble des 6 thèmes.</i>	
<b>TABLE DES MATIÈRES ANALYTIQUE</b> .....	<b>6</b>
<i>Pour une présentation détaillée des contenus et de leur repérage dans l'ouvrage (Thème, chapitre, page).</i>	
<b>OUVERTURE THÈME 1</b> .....	<b>9</b>
<b>OUVERTURE THÈME 2</b> .....	<b>67</b>
<b>OUVERTURE THÈME 3</b> .....	<b>97</b>
<b>OUVERTURE THÈME 4</b> .....	<b>121</b>
<b>OUVERTURE THÈME 5</b> .....	<b>157</b>
<b>OUVERTURE THÈME 6</b> .....	<b>193</b>
<i>Pour une présentation rapide de l'organisation de chacun des 6 thèmes.</i>	
<b>INDEX ALPHABÉTIQUE</b> .....	<b>237</b>
<i>Pour aller directement à l'explication d'une notion.</i>	

