

TOP5

DES ARTICLES

LES PLUS TÉLÉCHARGÉS

DOCUMENTATION DÉCOUVERTE

► OFFERT GRATUITEMENT
PAR TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

LE
TOP 5
des articles
les plus téléchargés



www.techniques-ingenieur.fr



EN EXCLUSIVITÉ, découvrez les 5 dossiers les plus téléchargés des Techniques de l'Ingénieur

→ Électricité photovoltaïque - Principes (réf. be8578)

→ Étanchéité en mécanique (réf. b5420)

→ Évaporation - Principes généraux (réf. F3003)

→ Aciers inoxydables - Propriétés. Résistance à la corrosion (réf. m4541)

→ Tomographie à rayons X (réf.p950)

INFOS

LES PACKS TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

Un pack est un accès à plusieurs bases documentaires et services traitant d'une même thématique.

En vous abonnant à un pack vous disposez de :

- › L'accès illimité à la base d'articles compris dans votre abonnement
- › La mise à jour en ligne permanente
- › Un bulletin de veille et un flux RSS
- › L'accès à toutes les fonctionnalités du site : moteur de recherche, newsletter, annotations d'articles, commentaires,
- › La gestion de votre documentation en ligne : création de votre propre bibliothèque d'articles et annoter les articles en toute confidentialité,
- › L'accès aux informations complémentaires « pour en savoir plus » : bibliographie, normes, réglementations, liens utiles,
- › Avec la Communauté des Techniques de l'Ingénieur : vous pouvez commenter un article et, poser vos questions. Les auteurs, éditeurs et utilisateurs sont à votre écoute.

Les services associés à votre abonnement

- › Séminaires en ligne : formations à distance pour optimiser votre veille scientifique et technologique
- › Les articles découvertes
- › Le dictionnaire technique multilingue
- › L'espace veille et actualités
- › Les archives**
- › Le service question / réponse**
- › Et retrouvez également tout le contenu Techniques de l'Ingénieur sur notre application iPad

*France métropolitaine uniquement

**Sur certains pack

be8578

Électricité photovoltaïque - Principes

Date de publication : 10/01/2013

Par :

Abdelilah SLAOUI

Directeur de recherche, Laboratoire des Sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie (ICUBE), CNRS et Université de Strasbourg

Cet article fait partie de la base documentaire :

Nouvelles technologies, énergies renouvelables et stockage

Dans le pack : **Ressources énergétiques et stockage**

et dans l'univers : **Énergies**



Cet article peut être traduit dans la langue de votre choix.
Accédez au service *Traduction à la demande* dans votre espace « Mon compte ». (Service sur devis)

Document délivré le : 17/12/2014

Pour le compte : 7200034092 - // nc EDITIONS TECHNIQUES INGENIEUR // 217.109.84.129

Pour toute question :

Service Relation clientèle - Techniques de l'Ingénieur
249 rue de Crimée - 75019 - Paris

par mail infos.clients@teching.com ou au téléphone 00 33 (0) 1 53 35 20 20

Électricité photovoltaïque

Principes

par **Abdelilah SLAOUI**

Directeur de recherche

*Laboratoire des Sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie (ICUBE),
CNRS et Université de Strasbourg*

1. Physique du rayonnement solaire	BE 8 578v2	- 2
1.1 Rayonnement du corps noir : soleil hors atmosphère, constante solaire	—	2
1.2 Rayonnement perçu au sol : rôle de l'atmosphère	—	2
2. Physique du composant photovoltaïque	—	3
2.1 Électrons dans un potentiel périodique, schéma de bandes	—	3
2.2 Semi-conducteurs intrinsèques et dopés	—	5
2.3 Effet photovoltaïque	—	6
3. Caractéristiques et réponse spectrale	—	8
3.1 Paramètres caractéristiques et rendement de conversion d'une cellule	—	8
3.2 Rendement quantique d'une cellule.....	—	9
4. Convertisseur photovoltaïque	—	10
4.1 La cellule, un élément générateur de courant	—	10
4.2 Module photovoltaïque	—	10
4.3 Problème du stockage de l'énergie photovoltaïque	—	11
4.4 Effet de la température d'utilisation sur le module photovoltaïque.....	—	11
4.5 Modules hybrides photovoltaïque-thermique.....	—	12
4.6 Champs de modules et cellules sous concentration.....	—	12
4.7 Dimensionnement d'une installation photovoltaïque	—	12
Pour en savoir plus	Doc. BE 8 578v2	

La production d'électricité d'origine photovoltaïque, basée sur la conversion de la lumière du soleil, est en pleine expansion depuis deux décennies. Sa part dans le bouquet énergétique mondial de 2050 sera certainement importante compte tenu de la pénurie et/ou de la pollution des autres ressources.

Ce premier dossier [BE 8 578v2], consacré à la production d'électricité par conversion de la lumière du soleil à l'aide de cellules solaires, permet de donner au lecteur un minimum de connaissances des principes de la conversion photovoltaïque, incluant des notions relatives à l'énergie transmise par le soleil, ainsi que quelques éléments de physique des semi-conducteurs et des principaux mécanismes de transport des charges électriques. La connaissance des caractéristiques électriques fondamentales (tension, courant et rendement de conversion) du dispositif photovoltaïque et son usage en tant que générateur de courant (convertisseur lumière-électricité) sont nécessaires pour une évaluation rapide du dimensionnement d'une installation photovoltaïque.

Dans le dossier suivant [BE 8 579v2] les différentes filières d'élaboration du dispositif photovoltaïque de la cellule classique (à base de silicium massif) aux couches minces sont abordées ainsi que les potentialités d'autres matériaux semi-conducteurs binaires ou ternaires et organiques.

Abréviations	
μc-Si	Silicium microcristallin
a-Si	Silicium amorphe
CIS	Chalcogénures
Cz	Tirage Czochralski
EMC	Croissance électromagnétique
FZ	Tirage par zone flottante
HIT	Hétérostructure
mc-Si	Silicium multicristallin
pc-Si	Silicium polycristallin
p-i-n	Structure à zone intrinsèque
pm-Si	Silicium polymorphe
p-n	Structure à jonction plane
RCC	Cellule à contacts arrières
Sc-Si	Silicium monocristallin

1. Physique du rayonnement solaire

Pour plus de détails sur l'intensité et l'énergie transmise par le soleil (considéré comme un corps noir), hors atmosphère et au niveau du sol, se référer au dossier [BE 8 210] *Rayonnement thermique des matériaux opaques*, ainsi qu'à l'ouvrage d'Alain Ricaud [1].

1.1 Rayonnement du corps noir : soleil hors atmosphère, constante solaire

On peut considérer, en première approximation, que l'énergie du rayonnement du soleil hors de l'atmosphère suit la loi du rayonnement du corps noir (figure 1). En effet, pour de grandes longueurs d'ondes, c'est-à-dire pour des photons peu énergétiques, la loi donnant l'énergie moyenne rayonnée $[E(\lambda, T)]$ par unité de volume des photons dans un intervalle de longueur d'onde $d\lambda$ se réduit à la loi classique de **Rayleigh-Jeans** (1) :

$$E(\lambda, T) d\lambda = (8\pi kT/\lambda^4) d\lambda \quad (1)$$

avec k constante de Boltzmann.

Ainsi, plus le corps noir émet à une température élevée, plus son rayonnement est énergétique, et la longueur d'onde du maximum énergétique diminue : c'est la loi de déplacement de Wien. Le rayonnement devient visible par l'œil humain pour des couleurs allant du rouge au violet.

En intégrant la densité moyenne d'énergie totale par unité de volume des photons sur toutes les fréquences (ou longueurs d'onde λ), nous obtenons la célèbre **loi de Stefan-Boltzmann** :

$$E(T) = \sigma T^4 \quad (2)$$

avec E (W/m^2) flux énergétique par unité de surface,
 σ constante de Stefan ($\sigma = 5,7 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$).

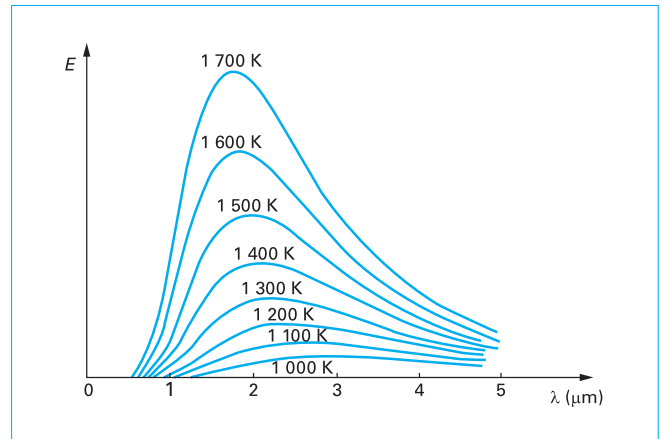


Figure 1 – Rayonnement du corps noir en fonction de sa température

Le soleil a une température de surface estimée à 5 760 K.

Le flux énergétique, en provenance de cet astre, intercepté dans l'angle solide représenté par la terre vaut :

$$E_0 = 1350 \text{ W/m}^2$$

Il est connu sous la dénomination : « **constante solaire** » hors atmosphère, c'est-à-dire pour une masse atmosphérique nulle (AM0, Air Mass 0).

1.2 Rayonnement perçu au sol : rôle de l'atmosphère

Pour la fabrication de cellules photovoltaïques à usage terrestre, il est nécessaire de connaître le **spectre du rayonnement solaire reçu au niveau du sol** (figure 2). L'atmosphère terrestre modifie le spectre énergétique du rayonnement solaire par l'action de trois mécanismes principaux :

- **l'absorption par les gaz** : chaque gaz possède des raies caractéristiques. Les plus marquantes sont, dans l'ordre des longueurs d'ondes croissantes : l'ozone (O_3), l'oxygène (O_2), toute une série de raies d'absorption, dues à la vapeur d'eau (H_2O), et dans l'infrarouge lointain au gaz carbonique CO_2 ;

- **la diffusion moléculaire de Rayleigh** est causée par les molécules d'air, dont la taille est très inférieure à la longueur d'onde de la lumière. La diffusion de Rayleigh varie en λ^{-4} et explique la couleur bleue du ciel clair et le passage de la couleur du soleil à l'orange et au rouge lorsqu'il est bas sur l'horizon (lorsque le soleil est bas, le trajet optique augmente et contribue à l'atténuation des UV et des longueurs d'onde du bleu) ;

- **la diffusion par les aérosols** (de taille semblable à la longueur d'onde de la lumière), **par les poussières et les fumées** (dont la taille des particules varie de 0,5 à 10 μm) provoque également une variation spectrale en λ^{-n} , avec n compris entre 0 et 4. Par contre, pour les gouttelettes d'eau des nuages, dont la taille est nettement supérieure à la longueur d'onde, la diffusion est sans variation de spectre. Elle provient de l'ensemble des phénomènes de réflexion, réfraction et de diffraction.

Le rayonnement diffus des jours à forte nébulosité peut représenter 10 à 15 % du rayonnement solaire arrivant au sol en provenance de toute la voûte céleste. Il est sans orientation particulière, et il est donc impossible de le concentrer au moyen de lentilles optiques.

Ainsi le rayonnement qui arrive au sol possède au moins deux composantes : une **composante diffuse** D et la **composante directe** I qui peut être collectée par des systèmes optiques à concentration. Le

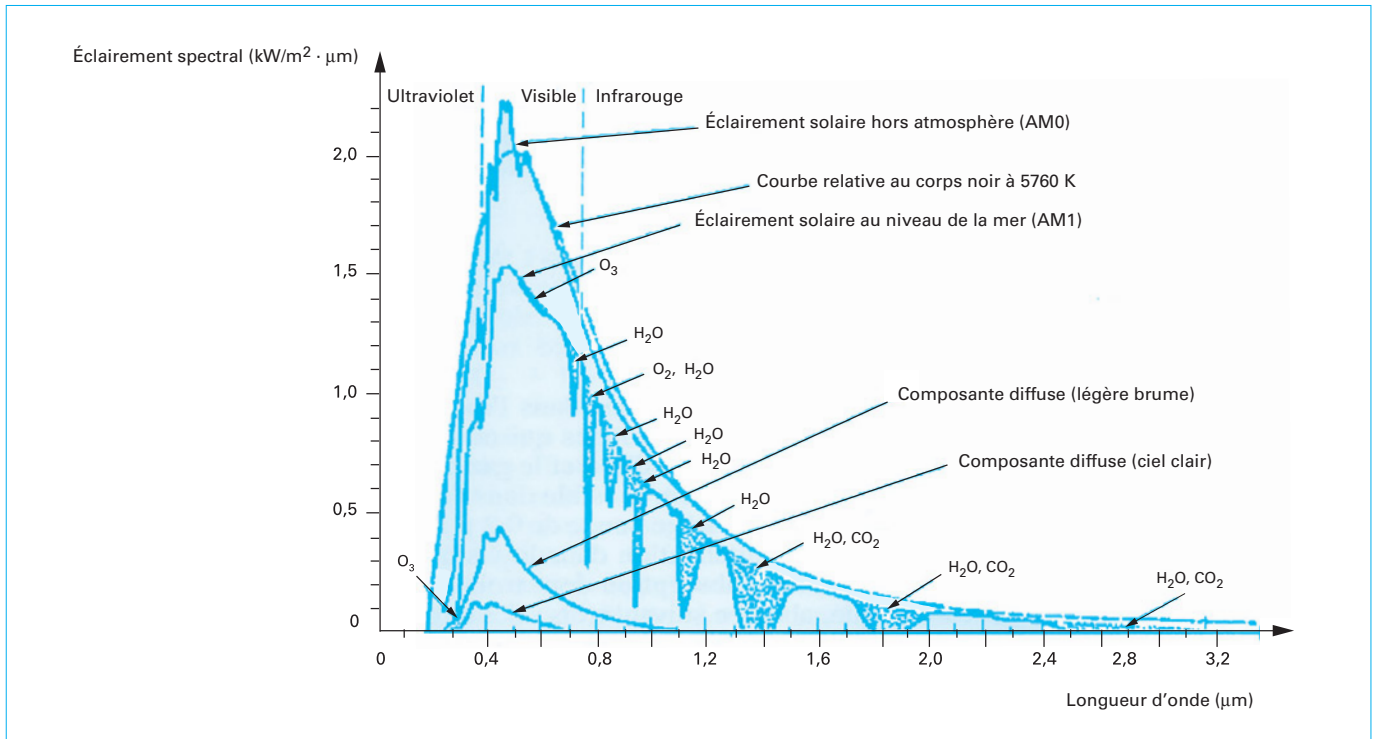


Figure 2 – Spectre de rayonnement du soleil et raies d'absorption par l'atmosphère

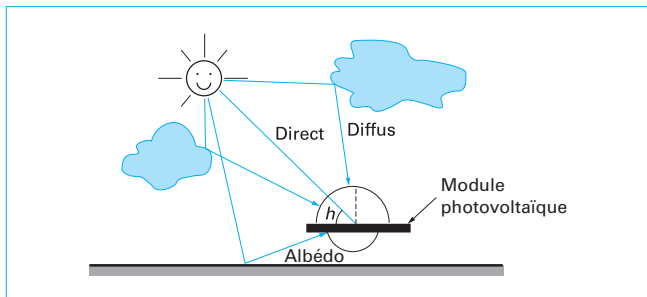


Figure 3 – Trois composantes du rayonnement solaire global

tout forme le **rayonnement global** G qui est le rayonnement pris en compte pour la détermination du rendement des cellules solaires.

Dans les régions nordiques, où le ciel est souvent couvert, le rayonnement diffus peut représenter jusqu'à 80 % du rayonnement global, de sorte que l'on peut poser directement les modules photovoltaïques au sol. Par contre, dans ce cas, on ne bénéficie plus de l'albédo (figure 3), c'est-à-dire de la fraction du rayonnement réfléchi par un sol blanc (*albedo* en latin).

Par convention, le rayonnement global G perçu au niveau du sol est donné en fonction de l'épaisseur atmosphérique effectivement traversée (Air Mass x , AMx) par rapport à l'épaisseur normalisée à 1 ($x = 1$) pour un soleil au zénith (Air Mass one, $AM1$).

On a un soleil sous $AM1,5$ lorsque le soleil fait un angle α avec l'horizon, tel que l'épaisseur d'atmosphère effectivement traversée est égale à une fois et demie l'épaisseur pour un soleil au zénith.

2. Physique du composant photovoltaïque

L'objectif de cette section est de présenter en termes simples quelques éléments du modèle physique du schéma de bandes dans les semi-conducteurs cristallins et de donner les formules de base qui régissent la répartition des électrons à l'équilibre thermodynamique et les mécanismes de la conduction électrique. Pour plus de détails sur cette partie, qui relève de la physique quantique des solides, on se référera à l'ouvrage d'Alain Ricard [1] *Photopiles solaires*, ainsi que l'ouvrage *Physique de l'état solide* de Kittel [2].

2.1 Électrons dans un potentiel périodique, schéma de bandes

2.1.1 Bandes d'énergie

Dans un cristal où les atomes sont liés à leurs proches voisins, il faut faire appel à la solution de l'équation de Schrödinger, proposée par Bloch en 1928, pour expliquer l'existence de **bandes d'énergies permises** séparées par une **bande d'énergie interdite**.

Pour ne pas rentrer dans des détails qui relèvent de la physique quantique des solides, il est suffisant de retenir qu'il existe une bande supérieure permise pour les électrons d'énergie E en fonction du vecteur d'onde (k) de l'onde électromagnétique associée au photon :

$$k = 2\pi/\lambda \quad (3)$$

La bande permise pour les électrons d'énergie E est appelée **bande de conduction** E_c avec des minimums d'énergie permise. La bande inférieure est appelée **bande de valence** E_v (figure 4) avec

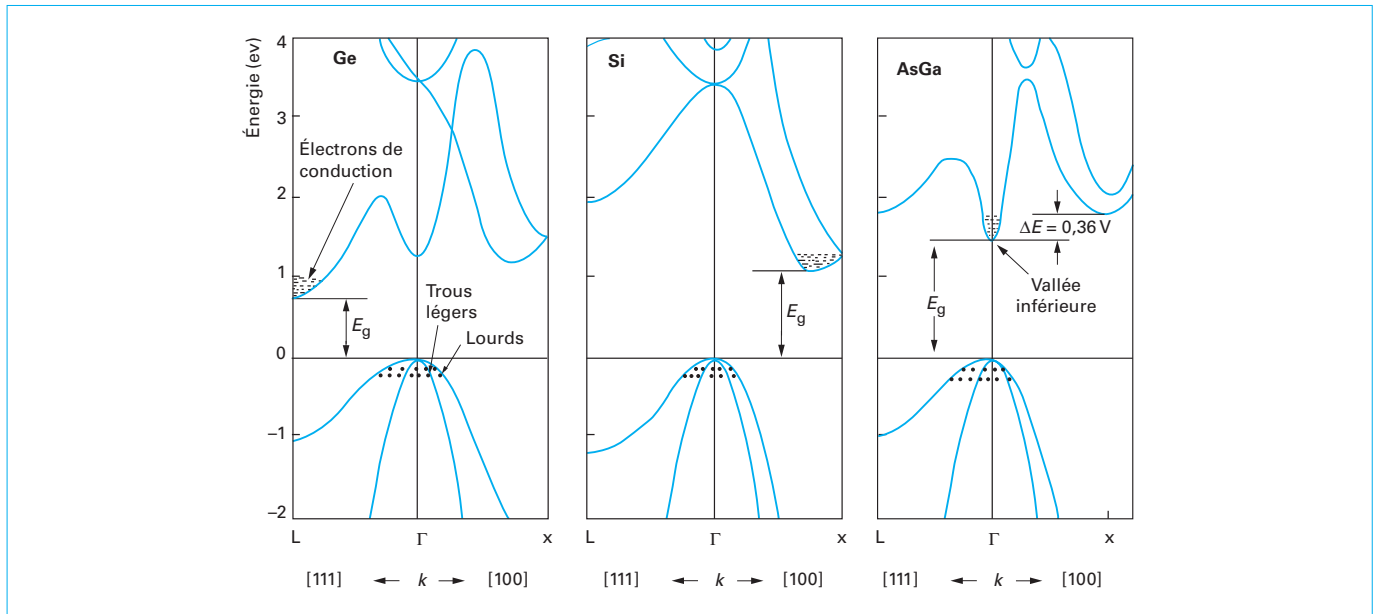


Figure 4 – Exemple de structures de bandes d'énergie de semi-conducteurs à gaps indirect (Ge et Si) et direct (AsGa)

des maximums d'énergie permise pour les vacances d'électrons, c'est-à-dire des **trous**. Les bandes E_c et E_v sont séparées par une bande d'énergie interdite E_g (g pour la dénomination anglaise de gap), et ne sont pas forcément en vis-à-vis, d'où la notion de semi-conducteurs à énergie de bande interdite directe ou indirecte.

Les matériaux composés binaires, tels que l'arsénure de gallium AsGa ou le tellure de cadmium CdTe, ou ternaires, comme les chalcogénures CuInSe₂, sont des semi-conducteurs à **gap direct**, alors que les semi-conducteurs de la colonne IV du tableau de classification périodique des éléments, comme le silicium et le germanium (Si, Ge), sont à **gap indirect** (figure 4).

Il y a une absorption optique dès que l'énergie d'un photon incident est suffisante pour déclencher le transfert d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction. La détermination expérimentale du seuil d'absorption optique constitue le moyen le plus simple de mesurer avec précision la largeur de bande interdite.

2.1.2 Caractère optique du rayonnement

La figure 5 donne la variation du **coefficient d'absorption optique** $\alpha(\lambda)$ en fonction de la longueur d'onde λ . L'intensité I de la lumière absorbée à une profondeur x dans le matériau suit la relation :

$$I(x) = I_0 \exp[-\alpha(\lambda)x] \tag{4}$$

À partir de cette relation, on détermine la profondeur d'absorption (échelle reportée à droite de la figure 5) de chaque longueur d'onde dans le matériau. Les radiations de courtes longueurs d'onde dans l'ultraviolet sont absorbées très rapidement, c'est-à-dire dans une zone proche de la surface du semi-conducteur. Le rayonnement infrarouge est absorbé sur une épaisseur plus importante, d'autant plus si le matériau est à énergie de bande interdite indirecte, comme c'est le cas pour le silicium cristallin (c-Si sur la figure 5). Cette dépendance de la profondeur d'absorption à la longueur d'onde limite les performances des cellules (paragraphe 2.3.2).

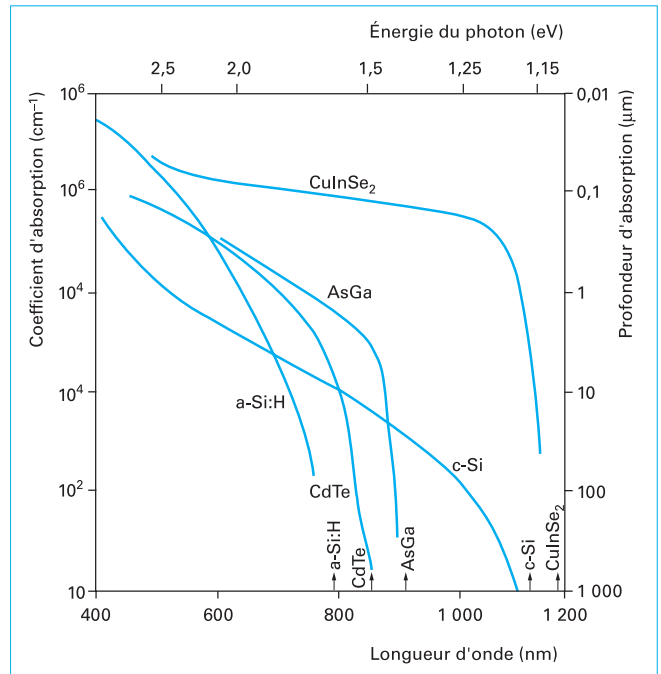


Figure 5 – Absorption optique des semi-conducteurs à gap direct et indirect

Pour les semi-conducteurs à énergie de bande de transition directe [AsGa, CdTe, CuInSe₂ ou silicium amorphe hydrogéné (a-Si : H)], le front d'absorption en fonction de l'énergie des photons, ou de leur longueur d'onde, est très raide (figure 5). La transition de bande de valence à bande de conduction est alors satisfaite sans faire intervenir une particule supplémentaire : le phonon, cette particule est associée aux modes vibratoires du réseau du cristal. Elle rend la

probabilité d'absorption plus faible et le front d'absorption plus progressif, comme c'est le cas pour le silicium.

Exemple : il faut une épaisseur de silicium de 200 à 300 μm pour absorber le rayonnement solaire alors que quelques micromètres de matière suffisent pour absorber le rayonnement pour les matériaux dits à énergie de bande interdite directe.

2.1.3 Caractère énergétique du photon associé

Après cette analyse du caractère optique du rayonnement, passons au caractère énergétique du photon associé. Selon la loi de la mécanique quantique d'équivalence, l'énergie minimale nécessaire au photon pour franchir la bande d'énergie interdite est égale à l'énergie de propagation électromagnétique de l'onde associée :

$$E = mc^2 = hc/\lambda \quad (5)$$

avec E énergie de la particule.

Le produit hc , où h est la constante de Planck et c la vitesse de la lumière, est une constante égale à 1,24 lorsque la longueur d'onde λ est exprimée en micromètre et l'énergie E en électron-volt (échelle reportée en haut de la figure 5).

Exemple : pour le silicium, où l'énergie de bande interdite E_g est égale à 1,12 eV, l'énergie minimale à apporter pour franchir la bande interdite est de 1,12 eV (figure 4), et toutes les longueurs d'ondes λ inférieures à 1,12 μm sont absorbées (figure 5). La partie du rayonnement solaire située dans l'infrarouge de longueurs d'ondes λ supérieures à 1,1 μm n'est pas absorbée et traverse la matière sans interaction (voir le paragraphe 2.3 sur les pertes).

2.2 Semi-conducteurs intrinsèques et dopés

Sous l'influence de la température, quelques électrons de la bande de valence peuvent acquérir suffisamment d'énergie pour franchir la bande d'énergie interdite et passer dans la bande de conduction.

2.2.1 Semi-conducteur intrinsèque

Pour un semi-conducteur intrinsèque, la probabilité de trouver un trou au-dessous du niveau d'équilibre des charges, appelé **niveau de Fermi** (E_F), est la même que celle de trouver un électron au-dessus du niveau de Fermi.

Pour une température donnée T , les concentrations d'électrons dans la bande de conduction [$n_c(T)$] et de trous [$p_v(T)$] dans la bande de valence sont égales $n_c(T) = p_v(T)$, et le niveau de Fermi est situé au milieu de la bande interdite (figure 6a).

La concentration intrinsèque des porteurs de charge (n_i) est donnée en faisant :

$$n_i^2 = n_c p_v = N_c N_v \exp(-E_g/kT)$$

avec N_c et N_v densités effectives d'états qui désignent, respectivement, un nombre de places disponibles en bas ou en haut des bandes de conduction et de valence.

$$n_i = 1,6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} \text{ pour le silicium}$$

2.2.2 Semi-conducteur dopé

Un **donneur** est une impureté qui s'est substituée à l'un des atomes du réseau, c'est-à-dire un élément atomique, dont le nombre d'électrons de valence est supérieur à celui de l'atome du réseau qu'il remplace.

■ Pour le silicium, ces éléments sont du groupe V du tableau périodique (P, AS, Sb). Sur les cinq électrons de valence d'un atome de phosphore incorporé au réseau de silicium, quatre servent à établir les liaisons chimiques covalentes et le cinquième se libère, sous l'effet de la température, dans la bande de conduction. L'atome donneur est alors ionisé positivement (figure 6b).

Sachant qu'à température ambiante toutes les impuretés sont déjà ionisées et que N_d est le nombre d'atomes donneurs, le nombre d'électrons n dans la bande de conduction est presque égal à N_{d+} . Comme ces électrons sont beaucoup plus nombreux que les électrons libérés par la température, le niveau de Fermi se déplace vers la bande de conduction.

Pour le silicium, où le nombre d'atomes est de $5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$, une concentration d'impuretés introduite d'une part par million (ppm) représente une concentration d'électrons dans la bande de conduction de $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Cette dernière est trois millions de fois plus importante que celle des porteurs intrinsèques. On dit alors que le matériau est dopé de **type n**, ou plus simplement qu'il est de type n (figure 6b).

■ Un semi-conducteur de **type p** du groupe IV est dopé par une impureté qui s'est substituée à l'un des atomes du réseau cristallin mais cette fois-ci, l'impureté est du groupe III (B, Al, Ga), et elle comporte trois électrons de valence (un de moins que l'atome qu'il remplace). Les liaisons manquantes (on parle de défauts d'électrons de valence) sont décrites comme des trous positifs p , dont la concentration est égale à celle des accepteurs N_a , en négligeant les trous libérés par la température. L'impureté s'ionise négativement. Le niveau de Fermi se déplace alors vers la bande de valence (figure 6c).

2.2.3 Jonction de deux semi-conducteurs dopés

Si maintenant on réunit deux semi-conducteurs de même bande interdite (figure 7a), l'un dopé n (avec une concentration de phosphore N_d de $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$), l'autre dopé p (avec une concentration de bore N_a de 10^{15} cm^{-3}), il se forme à la jonction entre ces deux matériaux une zone de transition. Afin de conserver l'équilibre des charges, on a : $-qN_a = qN_d$ (figure 7b), et on appelle cette région **zone de charge d'espace** ou **zone de déplétion**.

Le niveau de Fermi de la région dopée n est d'autant plus proche de la bande de conduction que le niveau de dopage au phosphore est élevé. De même, le niveau de Fermi de la région dopée p est proche de la bande de valence. La différence d'énergie entre leurs niveaux de Fermi est égale à la différence entre leurs potentiels chimiques. Comme ces potentiels doivent s'égaliser, il apparaît une différence d'énergie qV_b à la jonction entre les bandes de conduction et de valence respectives des deux semi-conducteurs dopés n et p . Le niveau de Fermi résultant de la réunion des deux matériaux est unique tout en restant proche de la bande de conduction dans la zone dopée n et proche de la bande de valence dans la zone dopée p (figure 7c). Cette barrière de potentiel (figure 7d) s'oppose au courant de majoritaires, c'est-à-dire aux électrons, pour les semi-conducteurs dopés n , ou aux trous, ceux dopés p , qui tendent à diffuser vers la région où ils sont peu nombreux. Le champ électrique qui règne dans la zone de transition est représenté figure 7e, et les concentrations en trous et en électrons sont données sur la figure 7f.

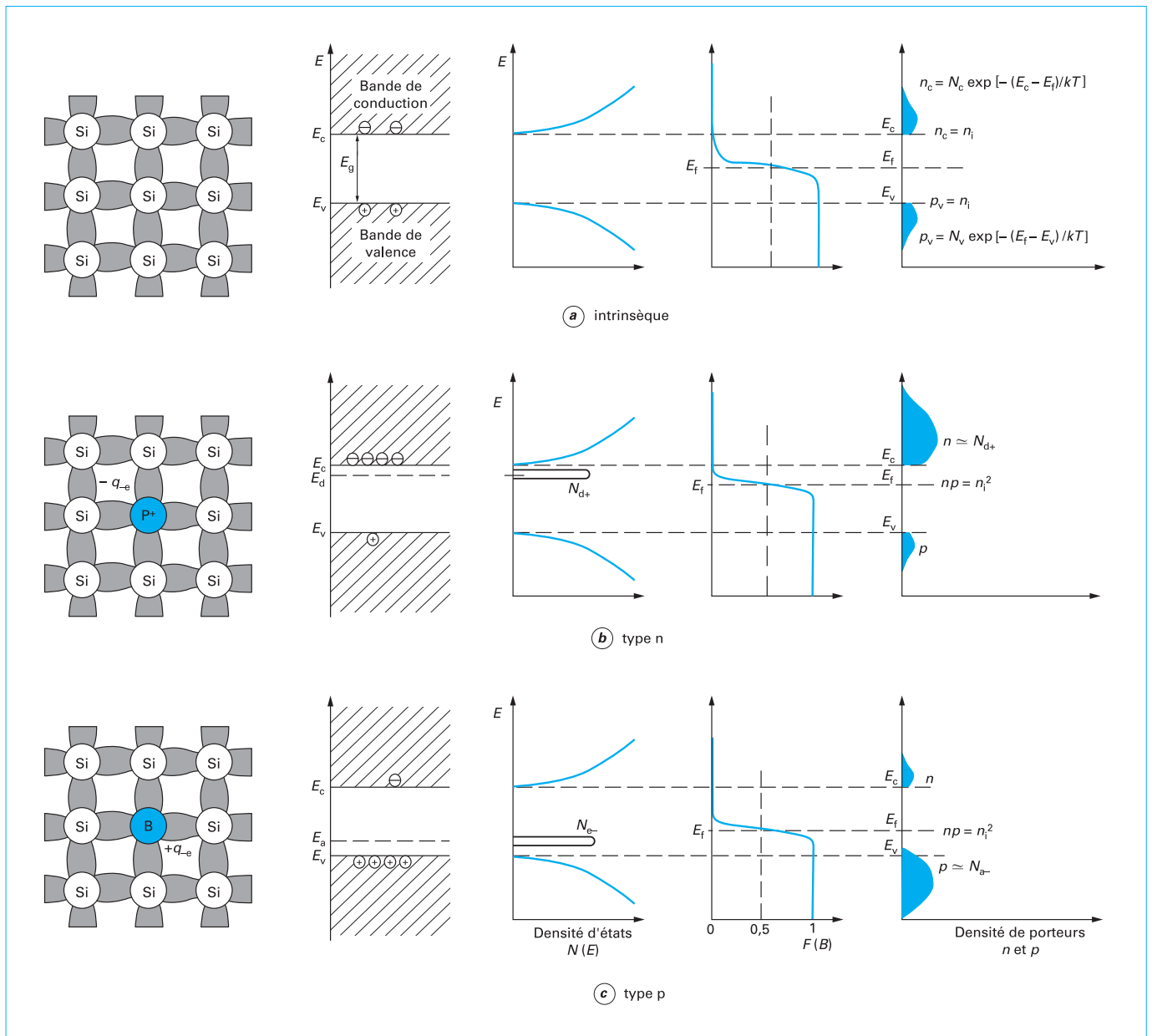


Figure 6 - Dopage des semi-conducteurs

En réalité, dans une cellule photovoltaïque au silicium, la jonction est très dissymétrique : le côté *p*, appelé **base**, est épais pour absorber une grande partie du rayonnement solaire (typiquement de l'ordre de 200 à 300 μm) et peu dopé en atomes de bore lors de sa fabrication (typiquement à une concentration de 5×10^{15} à $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$). Le côté *n*, appelé **émetteur**, est exposé à la lumière et est dopé par une diffusion d'atomes de phosphore sur une très faible épaisseur (typiquement de l'ordre de 0,3 μm) à une forte concentration, proche de la solubilité limite de l'élément dans le silicium (de 1 à $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$). Ainsi la barrière de potentiel maximale est de : $v_B = 0,9 \text{ V}$.

Les porteurs minoritaires (trous de la région *n* et électrons de la région *p*) vont migrer sous l'action du champ interne qui favorise

leur passage dans la région opposée à leur région d'origine. Ils donnent naissance à deux courants inverses de minoritaires qui s'additionnent pour s'opposer au courant de diffusion des majoritaires.

2.3 Effet photovoltaïque

2.3.1 Génération d'une paire électron-trou

Chaque photon incident de la lumière du soleil, ou de tout autre corps lumineux, crée dans le réseau cristallin du semi-conducteur une paire électron-trou (figure 8), si son énergie est suffisante pour

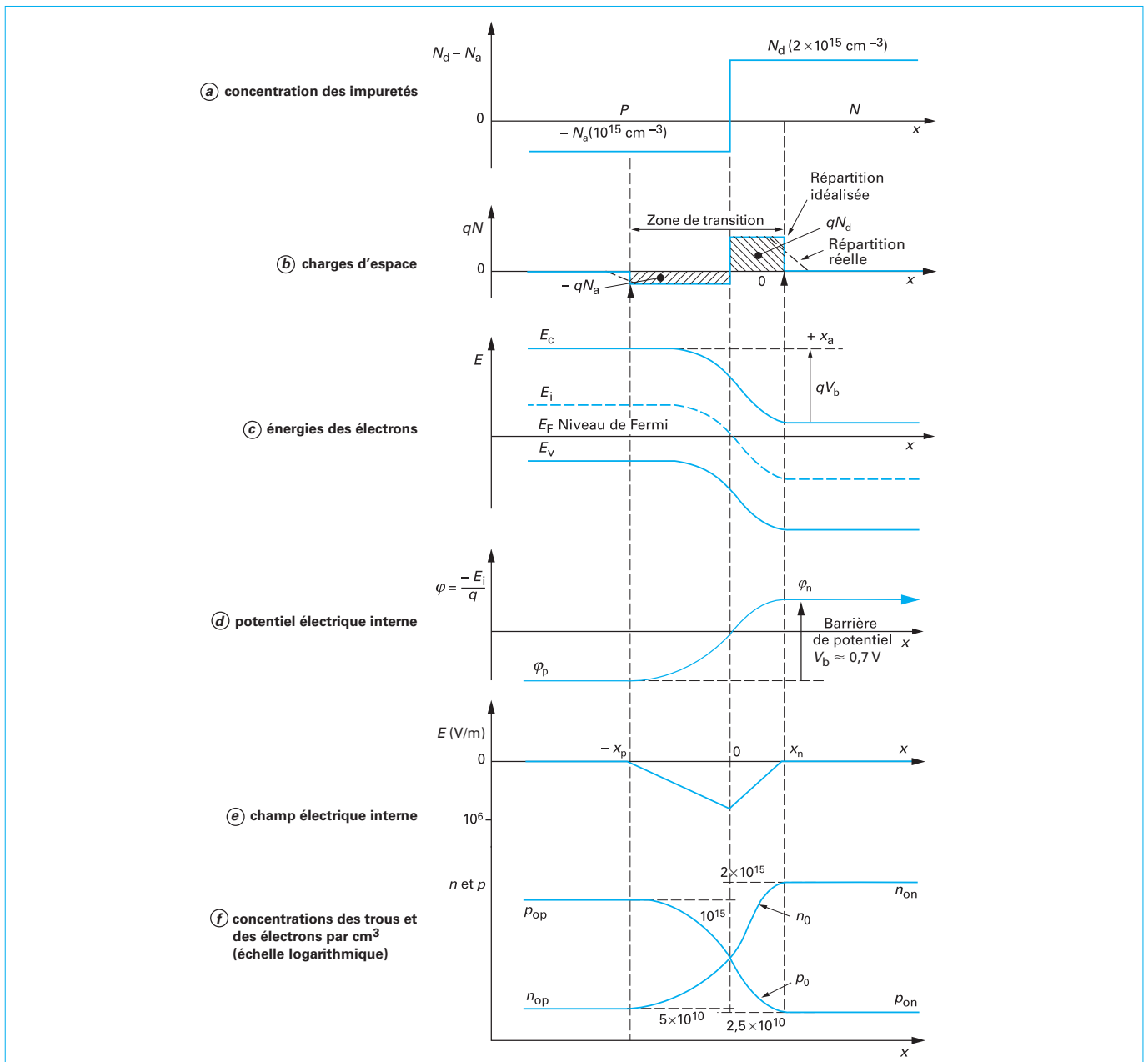


Figure 7 - Formation d'une jonction p-n entre deux semi-conducteurs dopés

provoquer la montée d'électrons supplémentaires aux électrons d'origine thermique de la bande de valence vers la bande de conduction.

2.3.2 Courant généré dans une cellule à jonction n-p

La figure 9 représente la jonction n-p d'une cellule solaire p + n, dont la hauteur de barrière, qV_b , est au mieux égale à 0,9 eV (q désigne la charge de l'électron). Un courant y circule, dont l'intensité (i) dépend des valeurs caractéristiques relatives à l'émetteur, à la zone de déplétion et à la base.

Dimensions typiques d'une cellule photovoltaïque :

- la zone dopée, n_0 , appelée émetteur (E), présente une concentration en atomes de phosphore de 1 à $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, son épaisseur est $w = 0,3 \mu\text{m}$;
- la zone de transition (de charge d'espace ou de déplétion), w , de l'ordre de $0,3 \mu\text{m}$, et s'étend presque totalement dans la zone moins dopée p_0 ;
- la zone dopée P_0 , appelée base (B), a une faible concentration d'atomes de bore, de 5×10^{15} à $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; son épaisseur e est de l'ordre de 200 à 300 μm , afin d'absorber la partie proche infrarouge du rayonnement solaire.

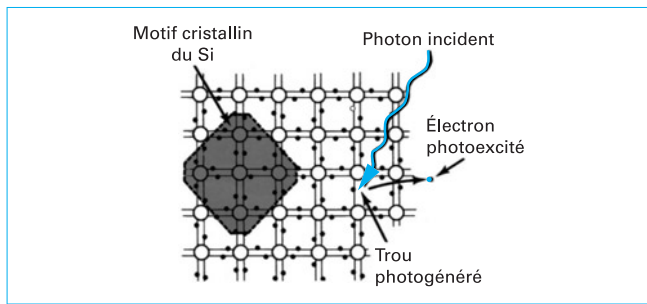


Figure 8 – Génération des paires électron-trou dans le réseau cristallin du silicium

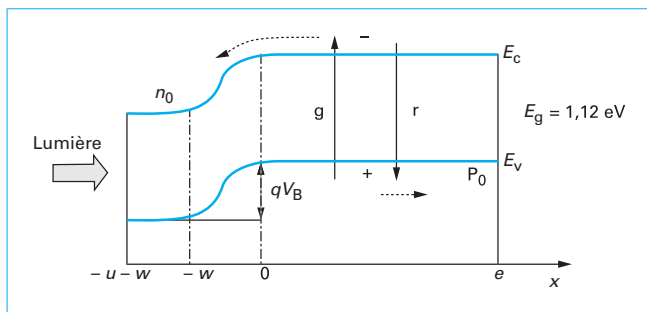


Figure 9 – Schéma de bande de la jonction $n-p$ d'une cellule solaire

Le courant résulte des taux nets de génération $[g(x, \Phi_{ph})]$ et de recombinaison $[r(x, \Phi_{ph})]$ de photoporteurs, et est donné par :

$$i = g(x, \Phi_{ph}) - r(x, \Phi_{ph}) \quad (6)$$

$$i = i_{ph} - i_d \quad (7)$$

avec Φ_{ph} flux de photons incidents,

i_{ph} courant photogénéré à une profondeur x ,

i_d pertes de courant dans la diode à jonction $n-p$.

2.3.3 Pertes de paires électron-trou

■ Les plus importantes pertes non compressibles sont les **pertes radiatives dues aux photons trop énergétiques** (ultraviolet UV) ou pas assez énergétiques (infrarouge : IR) pour générer une paire d'électron-trou :

– les **photons IR**, qui ne sont pas absorbés par la cellule, traversent tout le matériau (zone A de la figure 10). La perte en énergie due aux photons IR représente 18 % de l'énergie incidente ;

– les **photons UV** ne génèrent qu'une seule paire d'électron-trou. L'excédent d'énergie est transféré au réseau sous forme de chaleur et contribue à élever la température de la cellule en fonctionnement (zone B de la figure 10). La perte en énergie due aux photons UV représente 28 % de l'énergie incidente.

Il reste donc en théorie un rendement de conversion potentiel de 54 %. Malheureusement, il existe d'autres pertes qui sont d'origine électrique et optique.

■ Parmi les plus importantes pertes d'origine électrique, on cite la **perte en tension**. En effet, si la hauteur de barrière maximale est de l'ordre de 0,9 V pour le silicium, les meilleures tensions en circuit-ouvert (V_{oc}) sont de 600 mV et au maximum de 700 mV pour les cellules à très haut rendement.

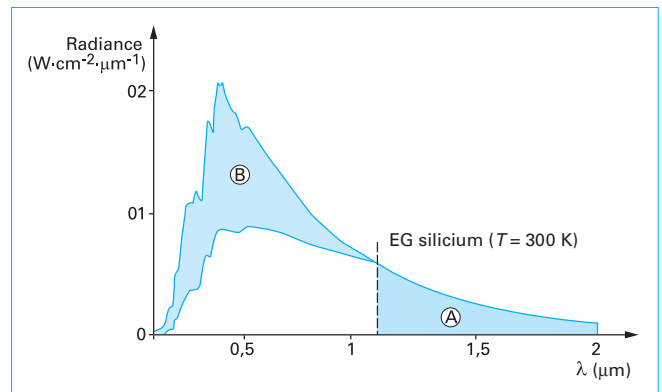


Figure 10 – Pertes des porteurs photogénérés par transmission et excès d'énergie

Le facteur de forme de la courbe de la diode (défini au paragraphe 3.1) est aussi un facteur important de pertes, ainsi que les recombinaisons des porteurs en surface ou en volume de la cellule (la diode n'est pas une diode parfaite) avec une résistance série et shunt des contacts. La grille métallique de collecte des charges sur la face frontale couvre 5 à 7 % de la surface totale.

■ Le silicium réfléchit 30 % de la lumière, les **pertes optiques** peuvent être réduites par le dépôt d'une **couche antireflet**. Au début de l'industrialisation, le dépôt était à base de TiO_2 . Maintenant, un dépôt de nitrure de silicium hydrogéné $SiN(H)$ est préféré pour ses bonnes propriétés antireflet (avec un taux résiduel de réflexion de 3 à 4 %) et surtout pour sa passivation de surface et de volume.

D'autres procédés permettent d'**améliorer le rendement** :

- la structuration de la surface en pyramides inversées ou en nid-d'abeilles augmente le piégeage de la lumière ;
- le dépôt de couches de passivation sur les surfaces et l'introduction d'un sur-dopage n^+ sous les doigts de la grille de collecte réduisent les pertes par résistance série des contacts ;
- l'application d'un champ électrique p^+ sur la face arrière diminue la recombinaison des porteurs générés trop près de cette face.

Ces opérations technologiques coûteuses permettent d'obtenir en laboratoire un rendement élevé, avec un record de 24,7 % proche du rendement théorique [3]. Le coût reste toutefois un facteur déterminant pour les cellules industrielles, dont les rendements se situent au moins à 8 points de rendement au-dessous de la valeur record.

3. Caractéristiques et réponse spectrale

3.1 Paramètres caractéristiques et rendement de conversion d'une cellule

Comme nous l'avons décrit précédemment, le courant est donné par la relation (7) :

$$i = i_{ph} - i_d$$

où i_d le courant d'obscurité circulant dans la jonction est égal à :

$$i_d = i_0 [\exp(qV/kT) - 1] \quad (8)$$

La densité de courant de court-circuit i_{cc} , déterminée pour $V=0$, est directement proportionnelle à l'éclairement i_{ph} :

$$i_{cc} = i_{ph} \quad (9)$$

On en déduit la tension en circuit-ouvert V_{co} par annulation du courant :

$$V_{co} = kT \ln (i_{ph}/i_0 + 1)/q \quad (10)$$

La puissance débitée par la cellule est : $P=IV$, et au point de fonctionnement maximal m :

$$P_m = I_m V_m \quad (11)$$

Le facteur de remplissage (ou de forme) FF est défini par le rapport :

$$FF = I_m V_m / (i_{cc} / V_{co}) \quad (12)$$

Le **rendement de conversion énergétique** η_C de la cellule est le plus souvent donné sous la forme suivante, en fonction des grandeurs mesurables :

$$\eta_C = FF i_{cc} V_{co} / P_{incid} \quad (13)$$

avec P_{incid} puissance incidente.

Par convention, le rendement de conversion d'une cellule est toujours mesuré pour une puissance incidente de 100 mW/cm^2 et un spectre solaire correspondant à un soleil sous AM1,5.

Exemple : la cellule représentée sur le graphique de la figure 11 a une densité de courant I_{cc} égale à 33 mA/cm^2 , une tension V_{co} de $0,56 \text{ V}$ et un facteur de remplissage FF égal à $0,81$. Elle a un rendement de conversion η_C de 15% .

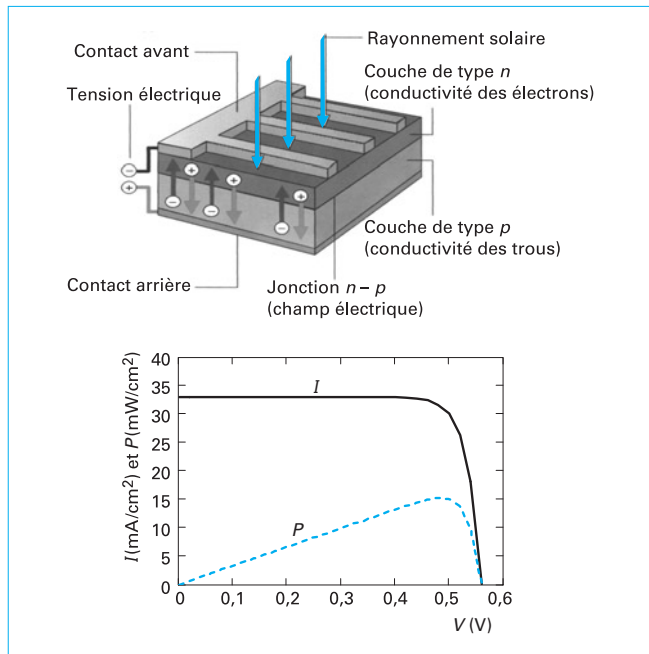


Figure 11 - Schéma et caractéristiques I-V d'une cellule

3.2 Rendement quantique d'une cellule

Le **courant photogénéré** $[i_{ph}(\lambda)]$ sur toute l'épaisseur e d'une base d'une cellule est la somme de trois contributions :

- la première, relative à l'absorption des photons, est en $\exp(-\alpha x)$;
- la deuxième dépend de la création de paires électron-trou que l'on peut considérer comme égal à 1 ;
- la troisième, en rapport avec la collecte des électrons, dépend de la longueur de diffusion des porteurs L_D dans la zone où ils sont minoritaires.

La **longueur de diffusion des porteurs minoritaires** L_D (c'est-à-dire des électrons L_n de la base ou des trous L_p de l'émetteur) est déterminée par la qualité du matériau et par son niveau de dopage :

$$L_D = (D\tau)^{1/2} = [(kT/q) \mu \tau]^{1/2} \quad (14)$$

avec $D = (kT/q) \mu$ coefficient de diffusion des électrons ou des trous,

μ ($\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) mobilité des électrons et des trous,

τ (s) durée de vie des électrons et des trous (τ_n ou τ_p).

Exemple : pour le silicium, $\mu_n = 1500 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ et $\mu_p = 600 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$.

Le **rendement quantique** d'une cellule $[\eta_Q(\lambda)]$ est donné par le rapport du courant photogénéré i_{ph} sur le flux de photons incidents Φ_{ph} . Il est la somme des rendements quantiques des trois zones relatives à l'émetteur (E), à la zone de charge d'espace (ou zone déplétion) (w) et à la base (B) :

$$\eta_Q(\lambda) = \eta_Q(\lambda)_E + \eta_Q(\lambda)_w + \eta_Q(\lambda)_B \quad (15)$$

Afin de simplifier la résolution du système d'équations différentielles, on considère généralement que :

- le photocourant est essentiellement composé dans l'émetteur d'un courant de trous minoritaires et dans la base d'un courant d'électrons minoritaires ;
- dans la zone de charge d'espace, compte tenu du champ intense qui y règne, toutes les paires y sont immédiatement séparées et collectées.

On peut ainsi exprimer le rendement quantique de la cellule (appelé également **réponse spectrale**) en fonction du coefficient d'absorption α , de l'épaisseur e et de la longueur de diffusion des porteurs minoritaires L_D . L'expression simplifiée du rendement quantique de la cellule pour la base $[\eta_Q(\lambda)_B]$ s'exprime par (pour l'émetteur, on remplace L_n par L_p) :

$$\eta_Q(\lambda)_B = \frac{i_{ph}}{q\Phi_0} = \frac{\alpha L_n}{\alpha L_n + 1} \left\{ 1 - \exp \left[-\alpha e \left(1 + \frac{1}{\alpha L_n} \right) \right] \right\} \quad (16)$$

Le rendement quantique dans la zone de déplétion est :

$$\eta_Q(\lambda)_w = \exp[-\alpha e (1 - \exp(-\alpha w))] \quad (17)$$

La figure 12 montre la réponse spectrale détaillée des trois zones (émetteur, zone de charge d'espace et base) de la cellule, ainsi que la réponse globale. On note que les contributions sont complémentaires :

- l'émetteur exploite les photons les plus énergétiques qui ne pénètrent que très peu dans le matériau ;
- la zone de déplétion est sensible aux radiations intermédiaires du visible (avec un maximum dans le jaune) ;
- la base s'occupe des photons de plus basse énergie jusqu'à la limite d'absorption du silicium à $1,1 \text{ eV}$.

L'importance relative des trois zones dépend d'une utilisation astucieuse des paramètres suivants :

- le coefficient d'absorption ;

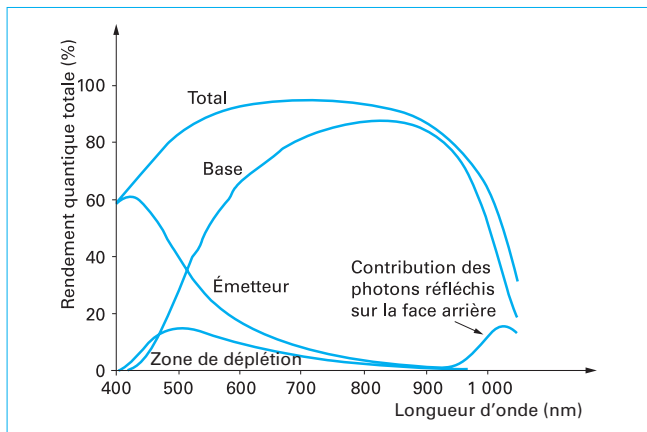


Figure 12 – Réponse spectrale d'une cellule (rendement quantique)

- la profondeur de jonction ;
- la longueur de diffusion ;
- les vitesses de recombinaison des trous et des électrons respectivement sur la face avant (S_p) et arrière (S_n). Il est à noter que la recombinaison en surface est d'autant plus importante que le dopage est élevé.

Exemple

Les valeurs typiques pour un émetteur n^+ dopé avec des atomes de phosphore à $N_d = 5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ sont :

$$D_p = 1 \text{ cm}^2/\text{s}, L_p = 1 \text{ }\mu\text{m}, \tau_p = 10^{-8} \text{ s}, S_p = 10^3 \text{ cm/s} ;$$

Les valeurs typiques pour une base p dopée avec des atomes de bore à $N_a = 1,5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ sont :

$$D_n = 20 \text{ cm}^2/\text{s}, L_n = 140 \text{ }\mu\text{m}, \tau_n = 10^{-5} \text{ s}, S_n = 10^2 \text{ cm/s}.$$

4. Convertisseur photovoltaïque

4.1 La cellule, un élément générateur de courant

Il est souvent très utile pour les utilisateurs et installateurs de systèmes photovoltaïques de considérer la cellule en tant qu'un élément générateur de courant.

4.1.1 Schéma équivalent d'une cellule solaire

Le schéma équivalent d'une cellule solaire (figure 13) comprend le générateur d'énergie, dont le courant I_{ph} est proportionnel à l'éclairement. Le courant I , défini par la relation (7), circule dans le circuit extérieur (c'est-à-dire dans la charge et dans la résistance série R_s). Il est égal à la différence entre le courant I_{ph} et le courant perdu dans la diode I_d qui circule dans la résistance de shunt R_{sh} .

Les valeurs de R_s résistance série et R_{sh} de shunt doivent être très faibles pour la première et élevées pour la seconde. Les valeurs typiques sont :

$$R_s = 0,5 \text{ à } 2 \text{ }\Omega \cdot \text{cm}^2$$

$$R_{sh} = 2 \times 10^3 \text{ à } 2 \times 10^4 \text{ }\Omega \cdot \text{cm}^2$$

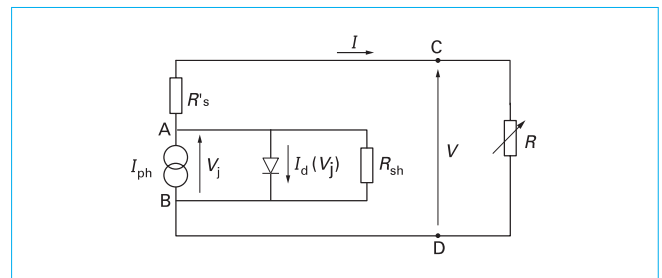


Figure 13 – Schéma équivalent d'une cellule

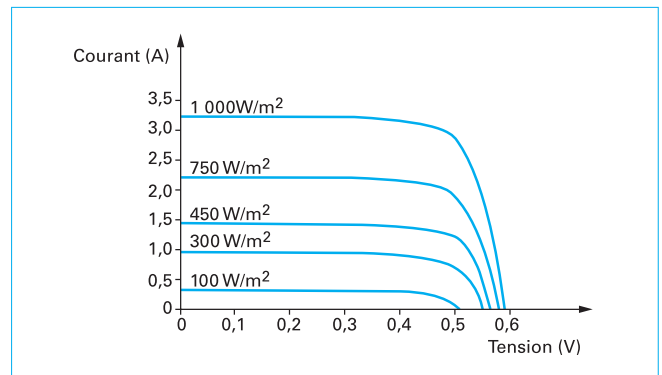


Figure 14 – Courant débité et tension aux bornes d'une cellule

4.1.2 Performances réelles d'une cellule solaire

Les performances réelles d'une cellule solaire de 10 cm de côté (c'est-à-dire de 100 cm^2), à une température maintenue à $25 \text{ }^\circ\text{C}$, sont données sur la figure 14.

Le courant de court-circuit est proportionnel à l'éclairement ($I = I_{ph}$). Le courant débité dans le circuit extérieur est de 3,2 A pour une intensité du rayonnement solaire de 1000 W/m^2 et de l'ordre de 300 mA pour une intensité du rayonnement de 100 W/m^2 .

Pour une journée sans soleil direct avec un rayonnement diffus de l'ordre de 100 W/m^2 , la tension chute de 580 mV à une valeur de l'ordre de 520 mV. Dans ce cas, le courant I_d perdu dans la diode n'est plus négligeable.

4.2 Module photovoltaïque

Les cellules individuelles sont assemblées en **montage en série** (les tensions s'additionnent, figure 15a) ou **en parallèle** (les courants s'additionnent, figure 15b). On réalise ainsi des modules photovoltaïques.

Les cellules sont triées par le fabricant afin qu'elles aient à peu près toutes les mêmes caractéristiques et pour éviter que la plus mauvaise cellule, c'est-à-dire celle de résistance série la plus élevée, ne détermine les performances de l'ensemble.

Un module relativement courant est représenté sur la figure 16. Ce module de 230 W [4] se compose de 54 cellules de $156 \text{ mm} \times 156 \text{ mm}$ et de $300 \text{ }\mu\text{m}$ d'épaisseur, montées en six rangées de neuf cellules. Deux rangées de neuf sont en série ; ainsi, on peut choisir une tension maximale de l'ordre de 9 V (montage parallèle des deux séries de 18 cellules) ou de 18 V (toutes les séries sont en série).

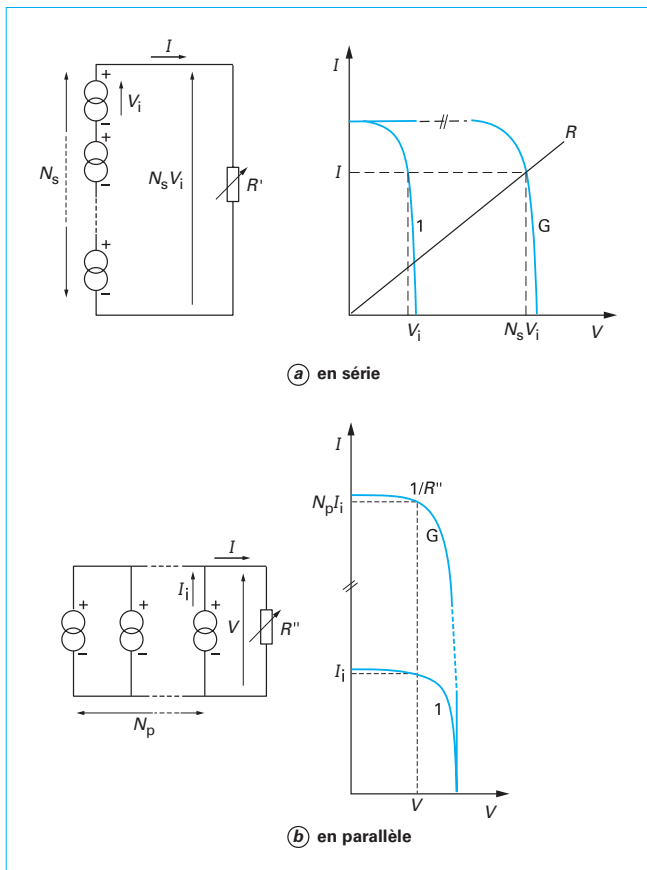


Figure 15 – Assemblage de cellules



Figure 16 – Module de 230 W (doc. EDF-PWT) composé de 60 cellules (6 × 9) de 156 mm × 156 mm

Le rapport entre ces deux surfaces T_f est appelé taux de foisonnement. C'est le taux d'occupation en cellules du module.

Pour le modèle de module de la figure 16, le taux T_f est égal à :

$$T_f = 81 \%$$

Pour assurer, par exemple, une recharge d'une batterie de 12 V, un système de diode antiretour et un système de contrôle de la charge complète l'installation.

4.3 Problème du stockage de l'énergie photovoltaïque

Il est nécessaire de stocker l'électricité chaque fois que la demande énergétique est décalée dans le temps par rapport à l'apport du soleil. Les durées de stockage peuvent être très variables, de quelques heures (passage de nuages), d'une nuit, à plusieurs jours ou plusieurs mois pour des systèmes autonomes, et selon le degré que l'on se fixe au niveau de la sécurité d'approvisionnement.

L'intérêt des **accumulateurs électrochimiques** est la disponibilité d'une tension quasiment constante. Le point de fonctionnement est fixé, par cette tension, sur une droite. Celle-ci doit être aussi proche que possible de la droite définissant la charge optimale d'un générateur photovoltaïque.

Les plus anciennes et les plus robustes, pour de profondes décharges, restent les batteries au plomb. Les accumulateurs du type Cd-Ni devront être abandonnés en raison de la prochaine interdiction du cadmium. Parmi les alternatives, on peut citer les accumulateurs qui utilisent un électrolyte liquide (ions lithium dans du bisulfure de titane) et qui ont une grande capacité de stockage, une bonne stabilité en température et une étanchéité parfaite.

Le stockage est le maillon faible d'un ensemble de production d'électricité photovoltaïque : en effet, la durée de vie des batteries est souvent inférieure à trois ans, pour des cycles avec des décharges profondes. Le temps de retour énergétique de la batterie est un autre point faible. Si le module photovoltaïque rembourse en 2 à 4 ans l'énergie dépensée pour sa fabrication, soit un dixième de sa durée de vie, en revanche, le temps de retour énergétique des batteries est de deux à quatre ans, et donc supérieur à la durée de vie de certaines batteries.

De ce fait, l'électricité photovoltaïque délivrée en courant continu, avec un stockage par batterie, est proche de 1,3 €/kWh. Alors que les systèmes connectés aux réseaux sont à 0,4 €/kWh. Il est donc urgent de lancer des programmes de recherche sur de nouvelles batteries (par exemple sur les batteries Li-Ions) afin d'allonger leur durée de vie et de rendre cette dernière la plus proche possible de celle des modules. La technologie Li-Ions présente des caractéristiques très intéressantes :

- fort rendement énergétique ;
- durée de vie élevée ;
- absence de maintenance ;
- prédictibilité du comportement.

La baisse des coûts et le développement du marché dépendent de trois facteurs : le coût du générateur photovoltaïque, le coût du stockage de l'énergie et le rendement global du système.

4.4 Effet de la température d'utilisation sur le module photovoltaïque

La température d'utilisation est un paramètre important dans le comportement des cellules et des modules photovoltaïques en raison de leur exposition à un flux énergétique solaire de 1 kW/m² (plus communément appelé irradiance). Avec une conversion au mieux de l'ordre de 15 %, cette énergie est majoritairement dissipée en chaleur (environ 80 %), le reste étant réfléchi (environ 5 %).

Ainsi en l'absence d'une ventilation correcte, la température de la cellule et du module peut monter à plus de 70 °C à midi (figure 17). On observe alors une légère augmentation du courant en raison de la diminution de la largeur de la bande interdite et une diminution significative de la tension (–0,4 %/K) en raison d'une forte augmentation du courant direct de la diode [4].

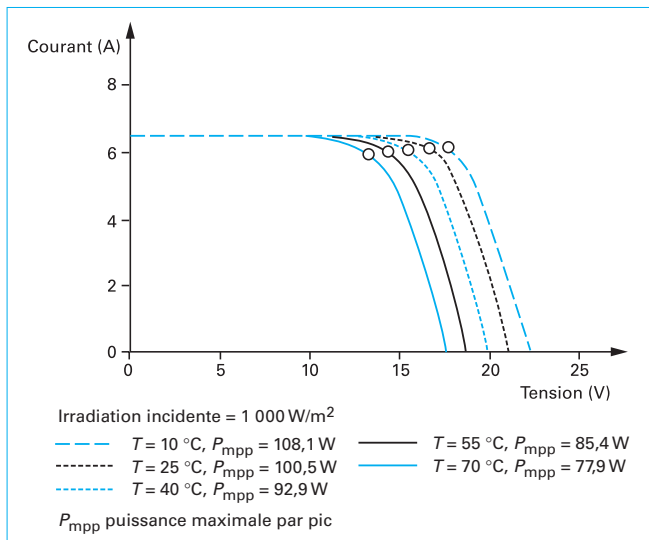


Figure 17 – Évolution des performances d'un module photovoltaïque en fonction de la température d'utilisation

En résumé, l'augmentation de température se traduit par une baisse de la puissance ($-0,35\%/K$) et surtout par un déplacement du point de puissance maximale, qui nécessite une adaptation de la valeur de la charge. Durant l'été, la perte peut représenter jusqu'à 12 % en relatif du rendement de conversion effectif moyen du module.

4.5 Modules hybrides photovoltaïque-thermique

Comme on vient de le voir, dans un panneau photovoltaïque classique, la conversion de la lumière en énergie dégage de la chaleur au sein du capteur et augmente ainsi sa température. Cette augmentation de température fait chuter le rendement électrique du module. Le module hybride photovoltaïque-thermique peut transformer cet inconvénient en avantage. Un schéma de principe du module hybride est montré sur la figure 18. La chaleur dégagée par la conversion est utilisée pour produire de l'eau chaude sanitaire, ou encore pour chauffer l'habitation par un réseau de circulation de la chaleur dans le plancher par exemple. Le rendement global de l'installation est ainsi nettement supérieur à celui d'un panneau classique (majoration de 10 à 15 % grâce au refroidissement hydraulique).

Avec ce type de système combiné, l'énergie solaire est transmise au fluide caloporteur qui la retransmet au ballon d'eau. Cette eau chaude est également utilisée pour le chauffage des locaux lorsque la température du ballon est suffisante. Ainsi, dans le cadre du développement du bâtiment à basse consommation, voire à énergie positive, la solution d'une toiture qui occupe toute la face sud et qui combine les fonctions couverture, production d'électricité et chauffage de la maison, est très séduisante.

4.6 Champs de modules et cellules sous concentration

■ Afin d'obtenir des puissances de quelques kilowatts à quelques mégawatts, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer entre eux, les modules en panneaux et de les monter en rangées de panneaux en série et en parallèle. Comme les modules n'ont pas tous une caractéristique identique, il y a des règles d'association pour coupler de façon optimale les modules d'une même ligne.

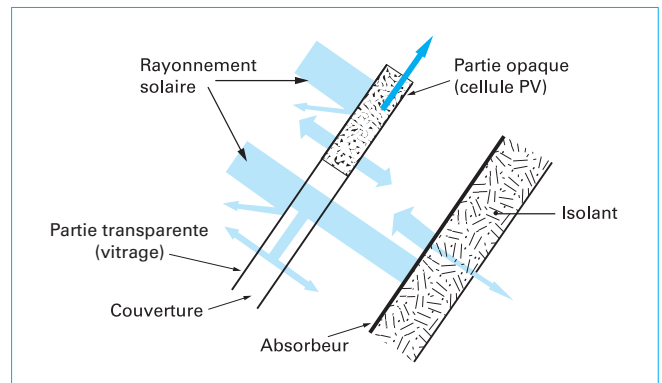


Figure 18 – Schéma de principe d'un module hybride (capteur photovoltaïque et capteur à air)

L'occlusion partielle d'une cellule, d'un groupe de cellules ou d'un module de l'ensemble du champ, se traduit par une transformation du générateur en récepteur (charge résistive) : au lieu de générer de l'énergie, cette zone en reçoit de la part des autres éléments bien éclairés. Elle doit alors dissiper une énergie thermique qui peut dépasser largement la capacité de sa structure. Si l'énergie n'est pas évacuée correctement, les dégradations sont redoutables et peuvent aller jusqu'à l'incendie. La protection la plus simple consiste à mettre des diodes de contournement, *by-pass*, pour éviter les points chauds, *hot-spot*.

■ Une autre façon d'augmenter le courant débité, autrement que par une mise en parallèle des cellules, consiste à focaliser le rayonnement solaire à l'aide de lentilles sur une cellule refroidie placée au foyer (figure 19).

Des facteurs de concentration n_c de 10 à 500 sont possibles. Le courant photogénéré est en théorie multiplié par le même facteur, si les pertes résistives et thermiques sont maîtrisées. La tension augmente, un peu, selon la relation :

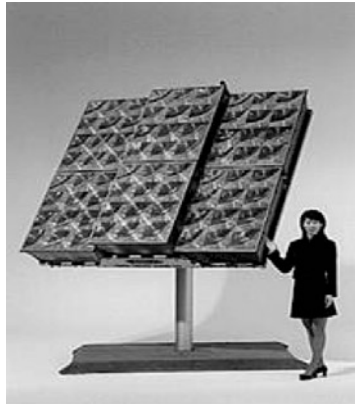
$$V_{co} = kT \ln [n_c (I_{ph}/I_0) + 1] / q \quad (18)$$

avec I_0 courant de saturation sous obscurité.

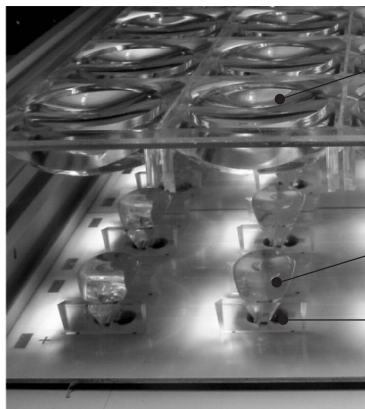
Les cellules, installées dans les systèmes à concentration, reçoivent une puissance lumineuse équivalente à celle de 10 à 500 soleils. Elles doivent donc être impérativement refroidies avec des radiateurs efficaces afin d'évacuer l'énergie dissipée. Cette dernière résulte d'une part des pertes ohmiques : $i^2 R_s$ – due au courant débité dans la résistance série R_s –, et d'autre part par l'énergie perdue par thermalisation et qui est la différence entre l'énergie absorbée et celle photogénérée.

4.7 Dimensionnement d'une installation photovoltaïque

L'énergie solaire globale G rayonnée au niveau du sol en France par an et par mètre carré est donnée sur la figure 20. Par convention, le rendement de conversion d'une cellule est toujours mesuré pour une puissance incidente de 100 mW/cm² et un spectre solaire correspondant à un soleil sous AM1,5. Le rayonnement global G perçu au niveau du sol est donc souvent donné en fonction du nombre total d'heures équivalentes à un plein ensoleillement, c'est-à-dire pour un flux énergétique (puissance) en provenance du soleil au niveau du sol de $E_{sol} = 1\,000\text{ W/m}^2$, que l'on peut trouver dans la littérature sous la dénomination « constante solaire » au niveau du sol.



a source : Sunpower, USA



b concentrateur HISICON (CEA, Fr)
Lentille primaire + lentille
secondaire collée sur la cellule

Figure 19 – Exemples de modules photovoltaïques avec lentilles de concentration

Si on choisit Lyon, comme lieu d'implantation d'une installation photovoltaïque qui assure les besoins d'une famille française de quatre personnes en énergie électrique, on a en moyenne l'équivalent de 1 500 h de plein ensoleillement par an.

La consommation de la famille en énergie électrique est estimée à 5 MWh/an. Ce chiffre ne prend pas en compte les besoins de chauffage et de production d'eau sanitaire, qui représentent souvent 80 % d'une consommation totale d'énergie de l'ordre de 25 MWh/an, et qui peuvent être satisfaits soit par des énergies fossiles ou, de préférence, par des capteurs solaires thermiques.

On dispose de cellules identiques à celle de la figure 16. Le rendement de l'onduleur, qui convertit le courant continu en courant alternatif, est généralement de l'ordre de 90 %. On calcule en premier le nombre de cellules indispensables pour assurer l'énergie strictement nécessaire, puis le nombre de modules de 60 cellules. Enfin, on détermine la surface réellement occupée, et le rendement global de l'installation pour le taux de foisonnement donné au paragraphe 4.2.

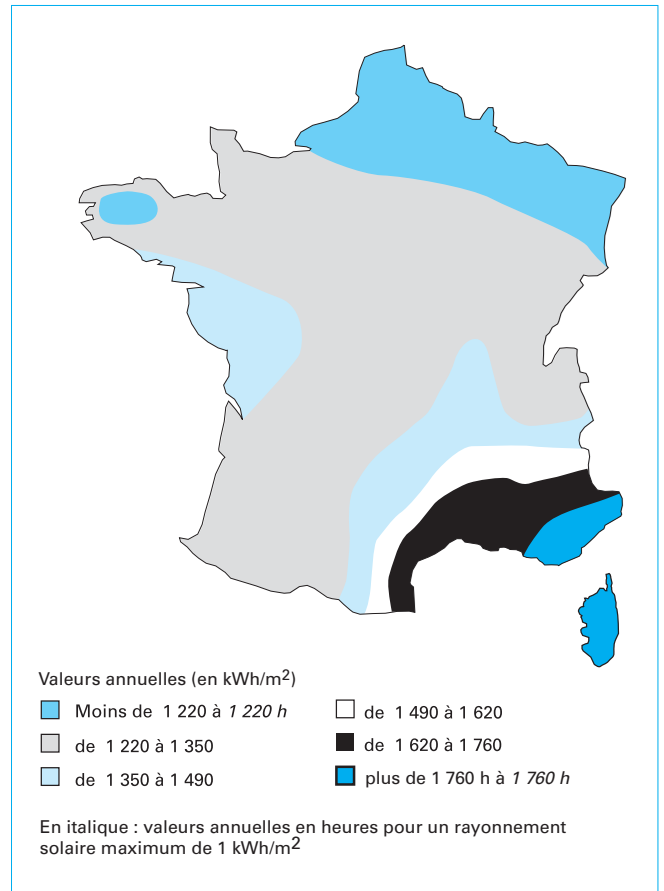


Figure 20 – Rayonnement solaire reçu en France sur un plan d'inclinaison égal à la latitude et orienté vers le sud

Les modules doivent être installés avec un angle d'inclinaison par rapport au sol égal à la latitude du lieu pour être dans une position optimale sur l'année, c'est-à-dire à 45° pour Lyon. Si l'on préfère optimiser pour l'été, on diminue cet angle de la moitié de l'angle de déclinaison maximal du soleil aux équinoxes, c'est-à-dire de 23°. On augmente du même angle pour l'hiver.

Le rendement de conversion énergétique de la cellule, défini au paragraphe 3.1 [relations (12) et (13)] est égal à :

$$\eta_C = FF I_{cc} V_{co} / P_{\text{incid}} = I_m V_m / P_{\text{incid}}$$

$$FF = I_m V_m / I_{cc} V_{co}$$

Le point de puissance maximale P_m se détermine graphiquement, pour la cellule de la figure 11, de la façon indiquée sur la figure 21 : on mesure le courant en fonction de la tension (courbe en bleu), et on en déduit I_{cc} et V_{co} . L'intersection de la droite de pente (I_{cc}/V_{co}) avec la courbe bleue donne P_m , I_m et V_m . On calcule alors le facteur de forme FF puis le rendement, ou directement le rendement.

Le rendement de conversion η_C des cellules en 2012 varie typiquement entre 16 et 22 % suivant la technologie employée, donnant des modules avec des rendements de 15 à 20 % pour les meilleurs (SUNPOWER par exemple).

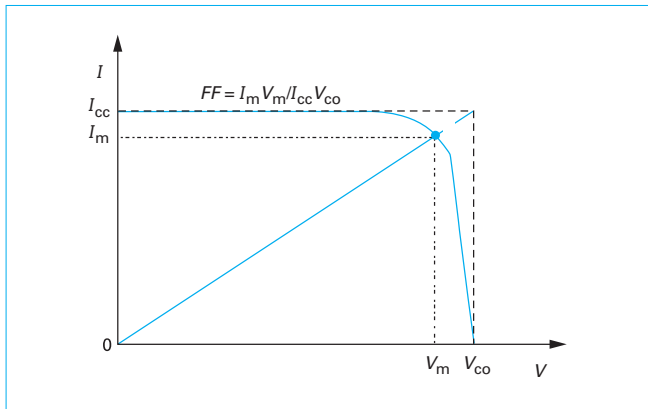


Figure 21 – Détermination graphique du facteur de forme FF

On en déduit l'énergie électrique annuelle E_e pouvant être produite par mètre carré, compte tenu du rendement de conversion de 13,5 % :

$$E_e = \eta_C \times \text{puissance rayonnée maximale par m}^2 \times \text{nombre d'heures de plein soleil}$$

$$E_e = 0,18 \times 1000 \text{ W/m}^2 \times 1500 \text{ h} = 270 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{an}$$

Comme les besoins sont de 5 MWh/an (en tenant compte des pertes dans l'onduleur), le nombre minimal de mètres carrés est de $18,5 \text{ m}^2$, soit 760 cellules de $15,6 \times 15,6 \text{ cm}^2$ ou 13 modules entiers de 60 cellules. Si le taux de foisonnement T_f est de 81 %, la surface du champ S_{ch} de module est :

$$S_{ch} = \text{nombre de modules} \times 1/T_f \times \text{surface des cellules}$$

$$S_{ch} = 13 \times 1,235 \times 60 \times 0,024 = 23,44 \text{ m}^2$$

C'est une surface raisonnable pour des toitures de maisons individuelles ou de petits immeubles.

Électricité photovoltaïque

Principes

par **Abdelilah SLAOUI**

Directeur de recherche
Laboratoire des Sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie (ICUBE),
CNRS et Université de Strasbourg

Sources bibliographiques

- [1] RICAUD (A.). – *Photopiles solaires « De la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés »*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne (1997).
- [2] KITTEL (C.). – *Physique de l'état solide*. Dunod Université, Paris (1994).
- [3] GREEN (M.A.), WANG (A.), ZHENG (G.F.), ZHANG (Z.), WENHAM (S.R.), ZHAO (J.), SHI (Z.) et HONSBURG (C.B.). – *23,5 % efficiency and other recent improvements in silicon solar cell and module performance*. Proc. 12th EC PVSEC, p. 776, Amsterdam (1994).
- [4] YASUI (R.K.) et SCHMIDT (L.W.). – Proc. 8th IEEE PV specialists Conf., p. 110 (1970).

À lire également dans nos bases

SLAOUI (A.). – *Électricité photovoltaïque – Matériaux et filières technologiques*. [BE 8 578] (2013).

Sites Internet

(portails, pages personnelles, forums, listes de discussion)

Événements

European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC) tous les ans en septembre ; 27^e édition à Francfort (DE) du 24 au 28 septembre 2012.

IEEE Photovoltaics Specialist Conference (IEEE PVS) tous les ans en juin aux États-Unis d'Amérique ; 38^e édition à Austin (Texas) du 3 au 8 juin 2012.

European Materials Research Society (EMRS) Conference tous les ans sessions spéciales sur les matériaux et composants photovoltaïques ; prochaine conférence aura à Strasbourg (FR) du 27 au 31 mai 2013.

International School on Materials for Renewable Energy ; Erice (Sicile) du 18 au 28 juillet 2012 ; prochaine édition aura lieu à Erice (Sicile) du 20 au 27 juillet 2014.

Journées Nationales sur le Photovoltaïque (JNPV), Dourdan (FR) du 12-14 décembre 2012.

Annuaire

Organismes – Fédérations – Associations (liste non exhaustive)

Syndicat des Énergies Renouvelables
<http://www.enr.fr/>

Fédération de l'énergie solaire (FEDESOL)
<http://www.fedesol-cnrs.fr/uploads/PDF/FLYER-FEDESOL.pdf>

European Photovoltaic Energy Plateforme
<http://www.eupvplatform.org/>

Documentation – Formation – Séminaires (liste non exhaustive)

Livre Blanc des Énergies Renouvelables 2012 ; Syndicat des Énergies Renouvelables
http://www.enr.fr/docs/2012115824_LivreBlancComplet.pdf

Formations en projets photovoltaïques par CYTHELIA
<http://www.cythelia.fr/photovoltaïque.php>

Formation en Énergie Solaire par TECSOL
<http://www.tecsol.fr/formation/>

Laboratoires – Bureaux d'études – Écoles – Centres de recherche (liste non exhaustive)

Institut de l'Énergie Solaire, INES, Chambéry (FR)
<http://www.ines-solaire.org/>

Institut du photovoltaïque d'Île-de-France (IPVIF)
<http://www.enscp.fr/spip.php?article509>

Institut d'Électronique du Solide et des Systèmes, InESS
<http://www-iness.c-strasbourg.fr/>

National Renewable Energy Laboratory, Golden (USA)
<http://www.nrel.gov/pv>

b5420

Étanchéité en mécanique

Date de publication : 10/10/2004

Par :

Jean MARTIN

Ingénieur de l'École nationale supérieure d'Arts et Métiers, Professeur de construction mécanique en IUT (Institut Universitaire de Technologie)

Cet article fait partie de la base documentaire :

Guidage mécanique

Dans le pack : **Fonctions et composants mécaniques**

et dans l'univers : **Mécanique**



Cet article peut être traduit dans la langue de votre choix.
Accédez au service *Traduction à la demande* dans votre espace « Mon compte ». (Service sur devis)

Document délivré le : 12/12/2014

Pour le compte : 7200034092 - // nc EDITIONS TECHNIQUES INGENIEUR // 217.109.84.129

Pour toute question :

Service Relation clientèle - Techniques de l'Ingénieur
249 rue de Crimée - 75019 - Paris

par mail infos.clients@teching.com ou au téléphone 00 33 (0) 1 53 35 20 20

Étanchéité en mécanique

par **Jean MARTIN**

Ingénieur de l'École nationale supérieure d'Arts et Métiers

Professeur de construction mécanique en IUT (Institut Universitaire de Technologie)

1. Types d'étanchéité	B 5 420 - 2
1.1 Définition d'une fuite.....	— 2
1.2 Étanchéité volumique.....	— 2
1.3 Étanchéité aux liaisons.....	— 2
2. Degrés d'étanchéité	— 3
3. Débit de fuite	— 3
3.1 Écoulement par diffusion ou perméabilité.....	— 3
3.2 Écoulement à travers un orifice	— 3
3.3 Utilisation du régime de fuite. Essais. Fonctionnement.....	— 4
4. Détection et mesure des fuites	— 5
4.1 Essais d'étanchéité	— 5
4.2 Contrôle en service.....	— 6
5. Étanchéité aux liaisons statiques	— 7
5.1 Étanchéité rigoureuse.....	— 7
5.2 Étanchéité relative	— 8
6. Étanchéité aux liaisons dynamiques en translation	— 20
6.1 Étanchéité rigoureuse.....	— 20
6.2 Étanchéité par fuite contrôlée.....	— 21
6.3 Étanchéité relative	— 22
7. Étanchéité aux liaisons dynamiques en rotation	— 28
7.1 Étanchéité rigoureuse.....	— 28
7.2 Étanchéité par fuite contrôlée.....	— 28
7.3 Étanchéité relative	— 30
Pour en savoir plus	Doc. B 5 420

L'étanchéité est une fonction qui revêt une importance de plus en plus grande en mécanique par suite, d'une part de l'utilisation croissante des fluides pour les commandes (hydrauliques, pneumatiques) et pour les contrôles et, d'autre part, du nombre très important et de la très grande diversité des composants mécaniques dans les réseaux de fluides.

Le confinement d'un gaz ou d'un liquide, de par sa nature, n'est pas aisé. Une fuite, même petite, peut avoir de multiples conséquences, tant sur le plan de la disponibilité du matériel que sur celui du fonctionnement et aussi de la sécurité. Des exemples courants montrent que des ensembles fort complexes, tels que les fusées, peuvent connaître des ennuis importants par suite d'une simple fuite. Une bonne fiabilité en matière d'étanchéité n'est pas souvent facile à obtenir.

En effet, l'étanchéité fait appel à de nombreuses notions de physique et de chimie où les propriétés des matériaux tiennent une place importante. De plus, les problèmes à résoudre sont variés et doivent intégrer un nombre important de paramètres difficiles à optimiser simultanément, spécialement en dynamique.

Les meilleures solutions en techniques d'étanchéité ne sont presque toujours que le résultat de savants compromis.

Notations et symboles		
Symbole	Désignation	Unité
C	couple.....	$m \cdot N$
D	diamètre de l'alésage.....	m
D_F	coefficient de diffusion	$m^2 \cdot s^{-1}$
D_g	diamètre de la gorge.....	m
D_{jm}	diamètre moyen du joint torique libre	m
F	force	N
L	longueur du parcours du fluide ou épaisseur de la paroi	m
P	pression du fluide	Pa
P_e	pression d'entrée	Pa
P_s	pression de sortie.....	Pa
Q_m	débit massique	$kg \cdot s^{-1}$
Q_v	débit volumique (liquide)	$m^3 \cdot s^{-1}$
S	aire.....	m^2
S_g	aire de la gorge	m^2
S_j	aire du jeu minimal d'écoulement du fluide.....	m^2
V	vitesse périphérique de l'arbre ..	$m \cdot s^{-1}$
W	puissance	W
d	diamètre de l'arbre.....	m
d_f	diamètre d'un défaut	m
d_j	diamètre de corde du joint torique libre	m
j	jeu diamétral.....	m
q	flux gazeux.....	$Pa \cdot m^3 \cdot s^{-1}$
q_D, q_i, q_M, q_v	flux par diffusion, intermédiaire, moléculaire, visqueux.....	$Pa \cdot m^3 \cdot s^{-1}$
t	temps	s
γ	tension superficielle du fluide....	$N \cdot m^{-1}$
δ	excentration arbre-alésage.....	m
η	viscosité dynamique absolue du fluide.....	$Pa \cdot s$
ρ	masse volumique du fluide.....	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_v	masse volumique unitaire du fluide.....	$kg \cdot m^{-3} \cdot Pa^{-1}$
ω	vitesse angulaire	$rad \cdot s^{-1}$

1. Types d'étanchéité

L'**étanchéité** est la qualité de confinement dans un appareil d'un fluide, liquide ou gaz, mais aussi de très fines particules solides en suspension dans un gaz.

1.1 Définition d'une fuite

L'étanchéité n'est plus satisfaite, en théorie, s'il existe une fuite, qui se traduit par l'écoulement du fluide confiné d'un côté à l'autre de la paroi de confinement sous l'action d'une différence de pression ou de concentration de part et d'autre de cette paroi.

Une fuite peut avoir deux causes :

- **perméabilité de la matière** : certains matériaux peuvent, même à température ordinaire, par une succession de phénomènes plus ou moins complexes d'absorption, de solubilité et de désorption, laisser passer le fluide ; les élastomères sont par exemple des matériaux relativement perméables, surtout avec certains gaz, alors que les métaux ne le sont pratiquement pas, tout au moins jusqu'à un certain seuil de température assez élevé (à titre indicatif, pour le nickel, vers 800 °C) ; toutefois, les fuites par perméabilité restent suffisamment faibles pour que, dans la plupart des applications, elles soient négligées ;

- **défauts débouchants** : il peut exister, ou se créer, par corrosion par exemple, dans la paroi ou aux surfaces de raccordement, des défauts (fissures, petits trous dans les soudures, rainures), qui constituent des chemins pour le fluide ; si des trous sont très petits et très nombreux tout en étant assez régulièrement répartis, le défaut s'appelle *porosité*.

1.2 Étanchéité volumique

Un appareil doit être étanche dans son intégralité, c'est-à-dire dans son volume. Ce volume est limité par sa surface extérieure, d'où les appellations d'**étanchéité volumique** ou **surfactive**. Le plus souvent, un appareil est l'assemblage de différentes parties. L'étanchéité totale est la somme de l'étanchéité des surfaces continues de la matière constituant l'enveloppe et de celle des surfaces de liaisons des différentes parties entre elles.

L'étanchéité volumique est généralement assez facile à obtenir et avec une très bonne qualité. C'est essentiellement la matière elle-même qui peut être responsable de fuites (perméabilité de certains matériaux hétérogènes, défauts de fonderie, réseaux moléculaires, etc.). Un choix judicieux du matériau et de son élaboration permet d'éliminer toutes ces perturbations.

Par contre, l'étanchéité aux liaisons pose les problèmes les plus nombreux et les plus difficiles à résoudre. La plupart des solutions proposées pour résoudre des problèmes d'étanchéité se rapportent aux liaisons.

1.3 Étanchéité aux liaisons

Il faut en distinguer deux types :

- **en statique**, la jonction doit être généralement démontable, au moins de temps à autre ; les surfaces assemblées sont variées : plans, sphères, cylindres, cônes, etc. ;

- **en dynamique**, la jonction est telle que l'une des deux surfaces est mobile par rapport à l'autre, ces surfaces étant souvent de même nature géométrique.

On distingue les étanchéités pour mouvement de translation, par exemple celle d'une tige de vérin au travers du corps, des étanchéités pour mouvement de rotation, telle celle d'un arbre de pompe à travers la volute. Celles relatives aux mouvements variés résultent toujours de la combinaison des deux précédentes.

2. Degrés d'étanchéité

Par suite de la structure moléculaire discontinue de la matière, une paroi de confinement ne peut, en théorie, assurer la conservation pendant un temps infini d'un fluide dont les molécules sont en mouvement : l'étanchéité absolue n'existe donc pas. Toutefois, une très bonne étanchéité est souvent nécessaire, ce qui se traduit par plus ou moins de difficultés à vaincre pour y parvenir. La qualité de l'étanchéité est très variable suivant les applications et il est possible de distinguer plusieurs niveaux ou degrés :

- l'**étanchéité rigoureuse** qui ne conduit à aucune fuite décelable avec les appareils de mesure utilisés ; ces appareils sont alors de très grande sensibilité et la fuite existante est extrêmement faible (de l'ordre de $10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) ;

- l'**étanchéité à fuite contrôlée** qui admet une fuite, mais déterminée à l'avance et pratiquement constante dans le temps ; ce type se rencontre essentiellement dans les étanchéités dynamiques ;

- l'**étanchéité relative**, qui admet une fuite, sa valeur dépendant de l'application du matériel ; elle peut varier dans une gamme très large allant de 10^{-12} à $10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, pour se situer le plus souvent entre 10^{-10} et $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; c'est évidemment le cas le plus courant.

Il ne faut pas oublier que réduire les fuites à des valeurs très faibles est souvent difficile et conduit à une augmentation des coûts. Le choix du degré d'étanchéité doit donc tenir compte de ce facteur.

3. Débit de fuite

Une fuite est caractérisée quantitativement par le débit du fluide qui s'échappe du confinement. Il s'exprime :

- soit par la masse qui circule par unité de temps, l'unité légale étant le kilogramme par seconde (kg/s) ; pratiquement, cette unité étant trop grande, ce sont des sous-multiples comme le gramme par seconde (g/s) ou par heure (g/h) qui sont le plus souvent utilisés ;

- soit par le volume qui circule par unité de temps, exprimé en mètre cube par seconde (m^3/s) ; là aussi, ce sont des sous-multiples comme le centimètre cube par seconde (cm^3/s) ou par heure (cm^3/h) qui sont souvent utilisés.

Si, avec les liquides, considérés comme incompressibles, la pression n'intervient pas, il n'en est pas de même avec les gaz. Il est nécessaire de préciser la pression de référence du gaz qui fuit. Pour cela, il est fait appel au flux gazeux q , ou débit énergétique, qui est égal à :

$$q = \frac{E}{t} \cdot P \quad (1)$$

avec E volume de fuite perdu, à la pression P pendant le temps t .

L'unité légale est le **pascal-mètre cube par seconde**. Cette unité est aussi égale au watt. D'autres unités sont utilisées, en particulier le lusec, dans les contrôles d'étanchéité. L'équivalence de ces unités avec l'unité légale est la suivante :

$$1 \text{ atm} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 0,1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$1 \text{ mbar} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1} = 0,1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$1 \text{ Torr} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1} = 0,13 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$1 \text{ lusec} = 1,3 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Le débit de fuite, ou flux gazeux, dépend du régime d'écoulement du fluide à travers les défauts, c'est-à-dire surtout de leurs dimensions et de la pression du fluide.

3.1 Écoulement par diffusion ou perméabilité

Ce type de fuite a surtout lieu avec les gaz.

Le flux gazeux q_D par diffusion est donné par :

$$q_D = \frac{D_F S (P_e - P_s)}{L} \quad (2)$$

avec D_F coefficient de diffusion,

L épaisseur de la paroi,

S aire de diffusion de la paroi.

Des valeurs de D_F des principaux élastomères et matières plastiques sont données pour quelques gaz dans le tableau 1 ; ce coefficient augmente rapidement avec la température.

3.2 Écoulement à travers un orifice

Il faut distinguer quatre types d'écoulement.

3.2.1 Écoulement turbulent

La pression et la vitesse du fluide sont élevées, le diamètre du défaut est supérieur à 10^{-4} m. Le débit massique est proportionnel à la racine carrée du gradient de pression et dépend beaucoup de la rugosité de la paroi. Ce régime est caractérisé par un nombre de Reynolds supérieur à 2 200. Il ne se rencontre que pour des fuites importantes, essentiellement avec les gaz ; ces fuites sont le plus souvent inadmissibles.

3.2.2 Écoulement laminaire ou visqueux

La pression et la vitesse du fluide sont plus faibles que dans le cas précédent. Les lignes de courants ont tendance à devenir rectilignes. La vitesse est pratiquement nulle près de la paroi. Le débit massique est proportionnel au gradient de pression et dépend très peu de la rugosité de la paroi. Ce régime est caractérisé par un nombre de Reynolds inférieur à 1 200.

Il faut remarquer que, pour des nombres de Reynolds compris entre 2 200 et 1 200, le régime peut être soit laminaire soit turbulent, suivant la rugosité ; il possède une certaine instabilité.

Avec les liquides ou les gaz, le débit massique est donné par :

$$Q_m = \frac{\pi d_f^4 \rho}{128 L \eta} (P_e - P_s) \quad (3)$$

Avec les liquides, il faut tenir compte des effets de capillarité. Ils exercent sur les bords d'entrée et de sortie du défaut une tension superficielle γ , à laquelle on peut faire correspondre une contre-pression égale à $\frac{4\gamma}{d_f}$ qui peut masquer la fuite.

Par exemple, avec de l'eau à 20 °C, $\gamma = 7 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, la contre-pression pour un défaut de diamètre égal à 10^{-6} m sera de $2,8 \times 10^5$ Pa.

Le débit massique vaut donc, en réalité, pour les liquides :

$$Q_m = \frac{\pi d_f^4 \rho}{128 L \eta} \left[P_e - \left(P_s + \frac{4\gamma}{d_f} \right) \right] \quad (4)$$

Ce régime est pratiquement celui rencontré avec les liquides dans le cas de nombreuses étanchéités industrielles courantes. L'ordre de grandeur du diamètre du défaut est de 10^{-5} m (ou un peu supérieur), le flux gazeux est alors supérieur à environ $10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Tableau 1 – Coefficient de diffusion D_F d'élastomères et de matières plastiques (en $10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

Matériau		Gaz		Oxygène		Azote		Gaz carbonique		Hydrogène		Méthane		Air	
		25 °C	50 °C	25 °C	50 °C	25 °C	50 °C	25 °C	50 °C	25 °C	50 °C	25 °C	50 °C	25 °C	
Élastomères	Butadiène acrylo-nitrile	3,2	10,5	0,9	3,7	23	66	11,5	31,5	2,4	10,1	1,3			
	Polychloroprène	3	10	0,9	3,55	19,5	56,5	10,3	28,5	2,5	9,8	1			
	Polyisobutylène	0,3	1	0,11	0,35	0,03	0,1	0,03	0,1	0,01	0,33	0,2			
	Poly(styrène/butadiène)	13	34,5	4,8	14,5	94	195	30,5	74	16	43	2,5			
	Silicone	100 à 600						300 à 600							
	Fluoré	1,5		0,4		7,5								0,6	
Matières plastiques	PTFE	0,5		0,1		0,5								0,1	
	Polyamide	0,35		0,01		0,16								0,02	

Le flux gazeux en régime visqueux q_v est :

$$q_v = \frac{\pi d_f^4}{128 L \eta} \left(\frac{P_e^2 - P_s^2}{2} \right) \quad (5)$$

Si la pression de gaz diminue, le régime d'écoulement visqueux change progressivement. Au-dessous d'une certaine pression, les filets gazeux, au contact des parois, s'en décollent. Il se produit un régime transitoire, le gaz ne se déplace plus d'un mouvement d'ensemble caractérisé par les filets du régime laminaire, les molécules acquièrent une certaine individualité. Ces molécules se propagent directement entre les parois du défaut, sans orientation définie et au détriment des chocs intermoléculaires. L'écoulement passe en régime moléculaire.

3.2.3 Écoulement moléculaire

Le libre parcours moyen des molécules est de l'ordre de grandeur du diamètre du défaut. L'action de la viscosité due aux collisions entre molécules devient négligeable.

L'écoulement est fortement influencé par la rugosité du défaut.

Ce régime est défini pour un nombre de Knudsen inférieur à 1, ce nombre étant donné par :

$$K_n = \frac{d_f}{\lambda_m} \quad (6)$$

avec λ_m libre parcours moyen des molécules.

Le flux gazeux q_M a pour expression :

$$q_M = \frac{d_f^3}{3 L} \left(\frac{\pi}{2 \rho_v} \right)^{1/2} (P_e - P_s) \quad (7)$$

avec ρ_v masse volumique unitaire du gaz définie par :

$$\rho_v = \frac{M}{RT}$$

avec M ($\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$) masse moléculaire,

R constante des gaz parfaits ($= 8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$),

T (K) température absolue.

Le régime moléculaire correspond à des défauts dont le diamètre est de l'ordre de 10^{-7} m (ou inférieur). C'est le cas des installations à haut degré d'étanchéité ; c'est souvent aussi celui des tests d'étanchéité par mise sous vide.

3.2.4 Régime intermédiaire (entre les écoulements visqueux et moléculaire)

Il est obtenu pour des nombres de Knudsen compris entre 1 et 200.

Le flux gazeux q_i est alors donné par :

$$q_i = q_v + Z q_M \quad (8)$$

avec Z fonction qui dépend de d_f , $(P_e - P_s)$, η et ρ_v , et qui varie de 0,88 pour un nombre de Knudsen de 1 à 0,81 pour un nombre de Knudsen de 200, pour l'air.

Il faut remarquer que la vitesse d'écoulement d'un gaz dans un défaut ne peut excéder la vitesse du son dans le gaz ; le flux gazeux a donc une limite supérieure. Il faut parfois vérifier si cette valeur n'est pas atteinte et en tenir compte.

3.3 Utilisation du régime de fuite. Essais. Fonctionnement

Dans le cas des liquides, pour les petites fuites, le régime est toujours laminaire. Pour des fuites importantes, de l'ordre de quelques centimètres cubes par seconde, il peut être turbulent.

En revanche, avec les gaz, les différents régimes de fuite se rencontrent. S'il s'agit d'un matériau ayant une perméabilité non négligeable, telle une membrane mince en élastomère, il est facile de calculer le flux gazeux qui la traverse à l'aide de la formule (2).

Pour les fuites dues à des défauts, la connaissance du régime d'écoulement est souvent nécessaire, spécialement avant le test d'étanchéité. En effet, les conditions de test (pression, température, nature du gaz) peuvent être différentes de celles du gaz à confiner dans l'utilisation.

Il faut pouvoir transposer le flux gazeux maximal admis en service, à celui en essais. Si les régimes de fuite sont identiques, les transpositions sont faciles, compte tenu des formules (3), (4), (5) et (7) ; encore faut-il connaître le régime dans lequel se produit la fuite, régime qui peut être déterminé à partir du nombre de Reynolds ou du nombre de Knudsen. Mais si le régime de fuite change, cette transposition est plus compliquée.

4. Détection et mesure des fuites

Il est nécessaire, après fabrication, parfois pendant la fabrication et avant mise en service, de contrôler si le dispositif de confinement répond au cahier des charges. Pour cela, des essais d'étanchéité sont effectués et éventuellement les défauts corrigés.

Mais une fuite peut se produire en service par suite d'une dégradation du matériel. Il est souvent important de détecter cette fuite et d'en connaître l'importance pour savoir si le matériel est encore apte au service. C'est le contrôle en service, différent de celui en fabrication.

4.1 Essais d'étanchéité

Par suite de la plus grande aptitude à fuir des gaz par rapport aux liquides, ce sont les premiers qui sont de très loin les plus utilisés

pour les détections et mesures des fuites en fabrication ou aux essais. La sensibilité est d'ailleurs d'autant meilleure que la masse volumique du gaz est plus faible. Ce serait donc l'hydrogène qui conviendrait le mieux mais, par suite des risques d'explosion qu'il entraîne, il n'est pratiquement pas utilisé. Le gaz de détection est souvent appelé gaz traceur. Parfois, le gaz d'essai est un mélange d'un gaz porteur, comme par exemple l'azote, et du gaz traceur.

Il existe de nombreuses méthodes de détection et de mesure de fuite, faisant appel à des appareillages très simples ou très sophistiqués, de sensibilité très variable.

On distingue les méthodes de localisation qui permettent de situer la fuite, et par suite généralement d'y porter remède si elle est prohibitive, et les méthodes de mesure de cette fuite. Certaines peuvent servir à la fois à la localisation et à la mesure [1].

Le tableau 2 en donne une synthèse.

4.1.1 Détection à la bulle

Consiste à badigeonner la surface à contrôler d'un liquide qui contient un agent moussant (méthode dite à la bulle de savon),

Tableau 2 – Essais d'étanchéité

Méthode	Gaz d'essai	Principe de la méthode	Restriction d'emploi	Sensibilité maximale $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Observations		
À la bulle (§ 4.1.1)	Air ou N_2	Badigeonner la surface avec un liquide additionné d'un produit moussant, le récipient est sous pression	Pièce ne supportant pas la pression	10^{-5}	Méthode de détection locale. Pression minimale nécessaire pour vaincre la pression capillaire		
Par immersion (§ 4.1.2)	Air ou N_2	Immerger l'appareil dans un liquide et recueillir le gaz dans une cloche graduée	Pièce ne supportant pas une immersion ni une pression	10^{-6}	Méthode de détection globale. Pression minimale nécessaire pour vaincre la pression superficielle		
Par chute de pression (§ 4.1.3)	Air	Isoler l'appareil sous pression et mesurer la chute de pression pendant un temps donné	Pièce ne supportant pas une pression	10^{-5}	Méthode de détection globale. Influence néfaste des variations de température		
Par remontée de pression (§ 4.1.4)	Vide	Isoler l'appareil après avoir fait le vide et mesurer la remontée de pression pendant un temps donné	Pièce ne supportant pas le vide. Surface dégazante	10^{-4}	Méthode de détection globale. Erreur par excès, par suite du dégazage des surfaces		
Par gaz traceur	NH_3 (§ 4.1.5.1)	NH_3	Placer sur la surface extérieure des bandes réactives à l'ammoniac et remplir de NH_3	Pièces grasses, en cuivre et ses alliages	10^{-8}	Méthode plutôt de détection locale. Problème de sécurité (explosion, asphyxie)	
	Gaz halogène (§ 4.1.5.2)	Fréon 12 ou Fréon 22	Plusieurs façons ; pour la plus courante, l'appareil est rempli de Fréon à basse pression et un détecteur est promené à l'extérieur	Problème de pollution, si un autre halogène est déjà présent	10^{-7}	Méthode plutôt de détection locale, mais aussi globale. Assez spécifique (industrie frigorifique)	
	Gaz radioactif (§ 4.1.5.3)	^{85}Kr	L'appareil est rempli par un gaz contenant du ^{85}Kr ; un compteur radioactif est placé à l'extérieur	Radioactivité interdite	10^{-10}	Précautions importantes vis-à-vis du personnel. Méthode de détection locale, voire globale	
	Hélium (§ 4.1.5.4)	par aspersion	He ou He + N_2	L'appareil est mis sous vide et en communication avec le détecteur (spectromètre). De l'hélium est envoyé à l'extérieur	Pièce ne supportant pas le vide	10^{-13}	Méthode de détection soit locale, soit globale (renifleur sur détecteur). Possibilité de descendre jusqu'à $10^{-14} \text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
		par reniflage	He ou He + N_2	L'appareil est gonflé d'hélium ou d'un gaz avec de l'hélium. On aspire avec une ventouse branchée sur un spectromètre	Aucune	10^{-11}	Méthode locale mais, par intégration, aussi globale
par ressuage		He ou He + N_2	La pièce est immergée dans l'hélium puis remise à l'air, puis mise sous vide avec pompage sur un spectromètre	Pièce ne supportant ni la pression, ni le vide	10^{-10}	Méthode globale. Petites pièces et en grandes séries	
Par ultrasons (§ 4.1.6)	Air	Un émetteur d'ultrasons 40 kHz est placé dans l'appareil. Un micro est promené à l'extérieur	Possibilité de placer un émetteur d'ultrasons	10^{-2}	Méthode de détection locale		

l'enceinte de confinement étant mise sous pression par de l'air ou de l'azote. Le liquide est souvent de l'eau additionnée d'un produit tensio-actif (*Teepol* ou alcool laurique sulfoné) qui réduit la tension superficielle. La surpression minimale ΔP_ℓ à appliquer pour vaincre la tension superficielle dans le cas de l'eau pure est :

$$\Delta P_\ell = \frac{2\sigma}{d_f}$$

Cette méthode, couramment utilisée, est surtout une méthode de localisation. La précision maximale obtenue par un opérateur exercé est de $10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

4.1.2 Détection par immersion

C'est un peu une version différente de la précédente (§ 4.1.1). L'appareil à tester est immergé dans un liquide et le gaz qui s'échappe est recueilli dans un dispositif gradué pendant un temps donné.

Il s'agit surtout d'une mesure du flux gazeux. La précision maximale est de l'ordre de $10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

4.1.3 Méthode par chute de pression

Cette méthode extrêmement simple consiste à gonfler l'appareil à tester à une pression déterminée, à l'isoler d'une manière sûre et à mesurer la baisse de pression ΔP pendant un temps donné t . Le flux gazeux est alors :

$$q = \frac{\Delta P \cdot E}{t}$$

avec E volume de l'appareil.

Une source d'erreur importante est la variation de température du gaz entre le début et la fin de l'essai, qu'il n'est pas facile de rendre pratiquement nulle. Une variation de température supérieure à $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ introduit une erreur significative qu'il est possible de corriger si l'on connaît cette variation. C'est une méthode surtout utilisée pour les grands volumes et pour des ensembles difficilement mobiles.

Compte tenu de la précision des manomètres actuels, de l'ordre de 1 Pa , le flux gazeux minimal décelable est de $10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Cette méthode est exclusivement quantitative.

4.1.4 Méthode par remontée de pression

C'est l'inverse de la précédente. L'appareil à tester est mis sous vide, puis isolé de la pompe à vide et la remontée de pression ΔP est mesurée pendant un temps t .

Le flux gazeux q est :

$$q = \frac{E \cdot \Delta P}{t}$$

Plus le volume est petit, plus la sensibilité est grande ; elle est limitée par le dégazage des parois et la sensibilité maximale est de l'ordre de $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. C'est une méthode très peu utilisée, qui n'est que quantitative.

4.1.5 Méthode par détection de gaz traceur

Plusieurs gaz peuvent être utilisés : ammoniac, gaz halogènes (en général *Fréons*), gaz radioactifs et hélium.

4.1.5.1 Ammoniac

L'appareil est rempli d'ammoniac à une pression relative basse, souvent de 2 à 3 bar. La surface extérieure de l'appareil à tester, ou simplement les parties à vérifier, sont recouvertes de bandes révélatrices imprégnées d'un mélange de bleu de bromophénol et

d'acide orthophosphorique. Les points de fuite sont impressionnés par l'ammoniac : il y a donc localisation. Une mesure dosimétrique permet d'apprécier l'ordre de grandeur de la fuite.

C'est une méthode sensible, le flux gazeux minimal décelable étant de $10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Elle s'applique surtout aux très grands volumes, supérieurs à 10 m^3 . Dans ce cas, des précautions d'emploi sont nécessaires.

4.1.5.2 Gaz halogènes

Le gaz traceur mis dans l'appareil à contrôler est le plus souvent du *Fréon 12*, voire du *Fréon 22*. Sa pression relative est de l'ordre de $0,05 \text{ MPa}$. Un appareil de détection spécial, utilisant les ions positifs émis par le gaz, explore la surface. La sensibilité est au maximum de $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. La méthode peut être globale ou de localisation. Elle est très courante dans l'industrie frigorifique.

4.1.5.3 Gaz radioactifs

Le gaz le plus utilisé est le krypton 85. Il est détecté par un compteur à scintillations.

La sensibilité est de $10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Cette méthode est intéressante pour des appareils d'accès difficile, mais l'emploi de radioéléments est une gêne importante.

4.1.5.4 Hélium

Il s'agit du gaz le plus intéressant et le plus utilisé. Sa détection est réalisée par un spectromètre de masse, ce qui permet d'avoir une sensibilité extrêmement grande atteignant $10^{-14} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Plusieurs possibilités d'utilisations existent, en particulier :

- **par aspersion** : l'appareil à contrôler est mis sous vide et en communication avec le détecteur ; l'hélium est injecté à l'extérieur, soit globalement (à l'intérieur d'une enveloppe légère en plastique contenant l'appareil), soit localement (directement sur les parties à vérifier, à l'aide d'une fine buse) ; la sensibilité est de $10^{-13} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, cette méthode est très employée industriellement ; la localisation et la mesure globale sont possibles ;

- **par reniflage** : de l'hélium est injecté dans l'appareil et aspiré, s'il y a fuite, par le détecteur extérieur, en particulier à l'aide d'une ventouse déplacée de proche en proche ; la sensibilité est de $10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;

- **par ressuage** : la pièce à contrôler est immergée dans l'hélium sous pression, puis remise à l'air ; elle est ensuite mise dans une enceinte à vide reliée au détecteur ; il n'y a pas de localisation possible ; cette méthode est utilisée pour des petites pièces et pour des grandes quantités à tester ; la sensibilité est de $10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

4.1.6 Méthode par ultrasons

C'est une méthode nouvelle encore peu développée et peu sensible. Un émetteur ultrasonore de 40 kHz est placé dans l'appareil et un micro sensible est déplacé sur la surface. Il y a une localisation possible de la fuite mais une mesure quantitative est difficile. La sensibilité maximale est de $10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

4.2 Contrôle en service

Il est beaucoup plus difficile de détecter et d'évaluer des fuites sur un appareil en service. Plusieurs procédés sont toutefois possibles.

4.2.1 Double barrière

D'une manière générale, cela consiste à entourer la barrière d'étanchéité d'une seconde barrière plus légère et à détecter la fuite dans l'espace ainsi constitué.

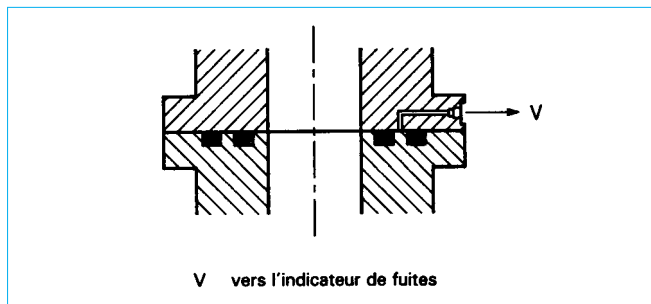


Figure 1 – Détection de fuite par double joint

Avec les **liquides**, un détecteur peut être placé au point bas. Par exemple, pour les tuyauteries véhiculant du sodium liquide, ce métal conducteur peut fermer un circuit électrique.

Avec les **gaz**, c'est l'augmentation de pression entre les deux barrières qui est généralement utilisée. Un cas très fréquent est celui des brides. Deux joints concentriques sont utilisés et l'espace entre eux est raccordé à un manomètre précis ou à un détecteur spécialisé (figure 1).

Le joint de récupération, non sollicité en permanence ou très peu lors d'une fuite, ne pose pas de difficultés.

4.2.2 Détecteur chimique

Il s'agit d'une substance chimique très sensible au gaz confiné. Si ce dernier fuit, il va agir sur cette substance. Ce procédé est utilisé par exemple sur des extractions de produits de ventilation que l'on fait passer dans un récipient enduit de réactif. Cette méthode ne permet pas en général une localisation de la fuite.

4.2.3 Détecteur acoustique

Lorsqu'un gaz s'écoule à travers un défaut, il atteint facilement la vitesse du son. Pour cela, il suffit en effet que le rapport des pressions de part et d'autre de la paroi soit supérieur à la valeur critique qui définit le seuil d'écoulement sonique (voisin de 0,5 pour l'air).

Une fuite importante, de l'ordre de $10^2 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, peut être entendue à l'oreille. Ce bruit diminue rapidement si le flux gazeux diminue et passe dans une bande non audible. Des micros adaptés permettent néanmoins de capter ces sons et de les transformer en signaux.

La localisation est possible. Plusieurs micros branchés en permanence permettent de détecter un début de fuite. La sensibilité est faible, de l'ordre de $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

5. Étanchéité aux liaisons statiques

Suivant le degré d'étanchéité (§ 2) à obtenir, diverses solutions sont possibles.

5.1 Étanchéité rigoureuse

Pratiquement, l'étanchéité rigoureuse ne peut être obtenue que par une liaison du type métallurgique (soudure ou brasure), c'est-à-dire avec diffusion au moins partielle des surfaces à joindre. Ce type de liaison est réputé indémontable, mais des formes particulières permettent un certain nombre de démontages, toutefois en nombre limité, le plus souvent de l'ordre de 10.

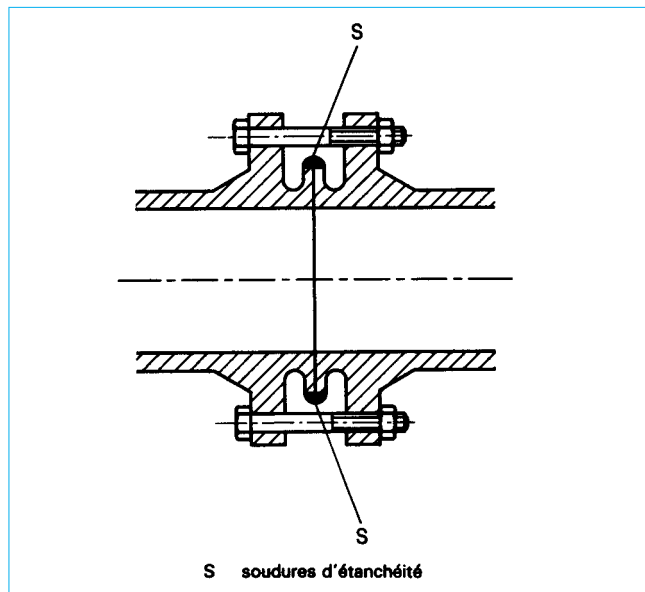


Figure 2 – Bride à souder

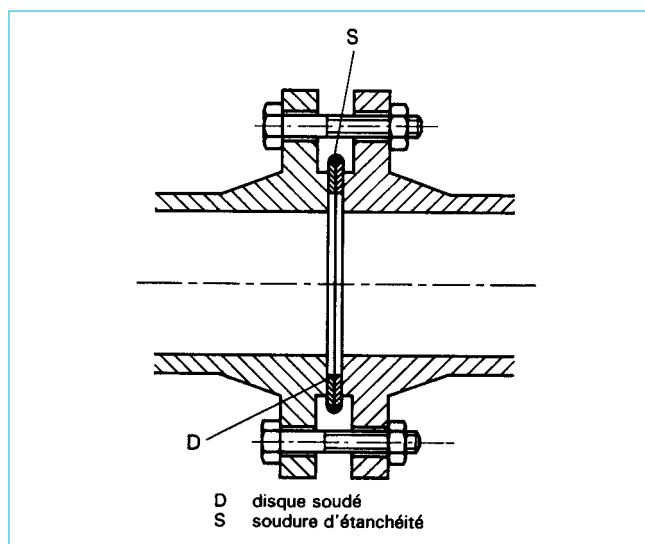


Figure 3 – Bride à souder à plaques rapportées

Une première solution, mise en œuvre sur les brides, dites brides type Sarlin, consiste à séparer la fonction jonction mécanique de celle d'étanchéité. Cette dernière est faite par soudure sur des parties minces (figure 2), qui peuvent être aisément meulées pour le démontage. La nouvelle soudure doit être réalisée sur un métal sain, donc sur un diamètre plus petit donné par un meulage de ravivage. Il existe donc une certaine consommation de matière des lèvres qui limite le nombre d'interventions. Toutefois il est possible d'en augmenter le nombre en rapportant les lèvres sous formes de disques minces soudés (figure 3).

Avec les liaisons filetées, il est aussi possible de disposer de bagues minces soudées, faciles à meuler. Il est nécessaire d'éloigner assez la soudure de la partie fileté, pour éviter les phénomènes

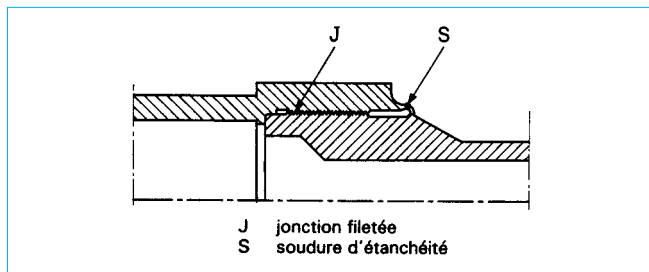


Figure 4 – Jonction filetée soudée

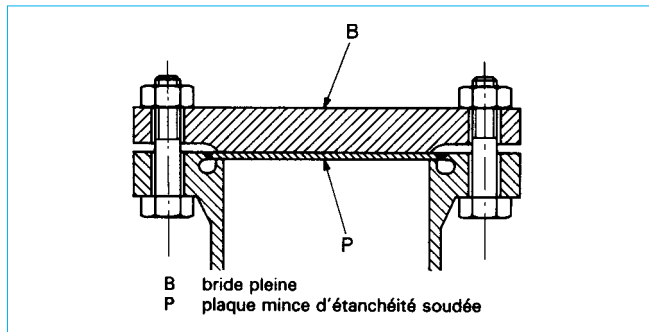


Figure 5 – Obturation par double plaque

nes de rétreint qui rendent le dévissage difficile. On doit donc prévoir une large gorge au droit de soudure qui facilite aussi le tronçonnage (figure 4).

Des astuces permettent des économies, telle par exemple la fermeture avec étanchéité rigoureuse d'un grand réservoir, réalisée par une plaque mince soudée sur la bride du réservoir, qui a été munie du côté interne d'une gorge, la plaque étant appuyée ensuite sur le couvercle épais qui tient la pression (figure 5).

5.2 Étanchéité relative

La disposition de deux surfaces appuyées l'une sur l'autre, même avec un effort important, ne conduit qu'à une étanchéité relative. En effet, toute surface comporte des défauts de fabrication, défauts de forme (ou macrodéfauts), défauts de surface proprement dits (microdéfauts ou rugosité). Tenter de limiter le nombre de ces défauts augmente toujours, parfois considérablement, le prix des pièces et il n'est jamais, malgré tout, possible de les supprimer totalement. Ces défauts sont la source de fuites, peut-être très petites mais mesurables. En outre, deux surfaces assemblées, bien qu'il s'agisse de jonctions statiques, subissent des microdéplacements relatifs par suite des sollicitations auxquelles tout assemblage est soumis : effet thermique, simplement par la variation de la température ambiante, effet mécanique par réaction des autres composants, etc. Tous ces défauts et sollicitations sont la source de fuites.

5.2.1 Étanchéité sans joint

Il est possible d'obtenir des étanchéités avec des taux de fuite faibles, au mieux de l'ordre de $10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, directement par serrage des deux surfaces assemblées sous certaines conditions.

La première est celle d'avoir des surfaces de géométrie correctes mais surtout de faible rugosité, par exemple R_a de l'ordre de 0,2 μm .

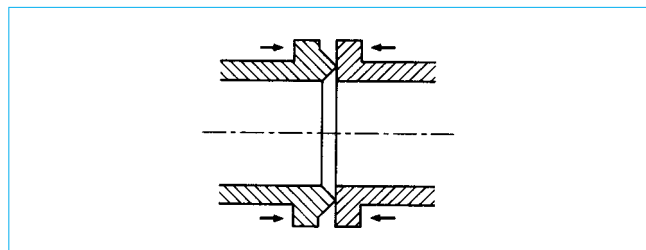


Figure 6 – Étanchéité couteaux-plan

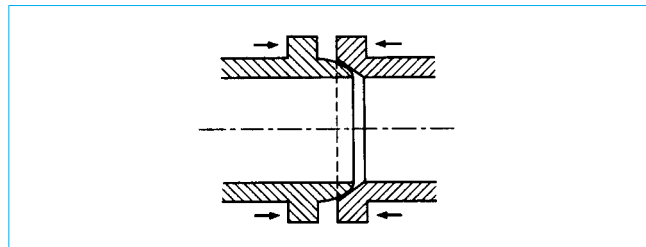


Figure 7 – Étanchéité cône-sphère

La pression de serrage doit être importante et est obtenue par une limitation de l'aire de contact d'une surface sur l'autre. Pour cela, les géométries des surfaces peuvent être du type couteaux-plan (figure 6), ou cône-sphère (figure 7).

Il est aussi intéressant que l'une des surfaces possède une dureté supérieure à l'autre de manière à faire pénétrer dans les défauts la matière la plus tendre, autant que cela est possible mais pratiquement jamais totalement.

Enfin, les assemblages n'auront que des dimensions réduites ; il semble en effet difficile d'obtenir une étanchéité de la classe de celle donnée ci-avant au-delà d'un diamètre de 80 mm.

Des raccords basés sur la jonction cône-sphère existent et donnent de bons résultats. Plus récemment, des raccords manchons en *alliages à mémoire* sont apparus : la jonction est du type cylindre sur cylindre et ils conduisent à une très forte pression de serrage ; malheureusement, la jonction est indémontable.

5.2.2 Étanchéité avec joint

Le joint permet une liaison de deux surfaces non parfaites et cela avec un degré d'étanchéité qui peut être très grand (taux de fuite inférieur à $10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

5.2.2.1 Propriétés d'un joint statique

Un joint doit posséder, pour assurer au mieux sa fonction, quatre propriétés. Il doit être :

- **élastique** pour suivre les variations dimensionnelles entre les surfaces à étancher sous l'action des différentes sollicitations et assurer en permanence un minimum d'effort de contact ;
- **plastique**, de manière à épouser au mieux les défauts de surface et en particulier ceux dus à la rugosité, sans toutefois fluer (figure 8) ;
- **impermeable** au fluide à étancher ;
- **compatible** avec le fluide, et cela dans toutes les conditions de fonctionnement.

Les deux premières propriétés sont peu compatibles et il faut en faire le meilleur compromis possible. Par ailleurs, l'effort de serrage pour assurer ces déformations élastiques et plastiques, exprimées souvent en effort linéaire de joint, avec pour unité le newton

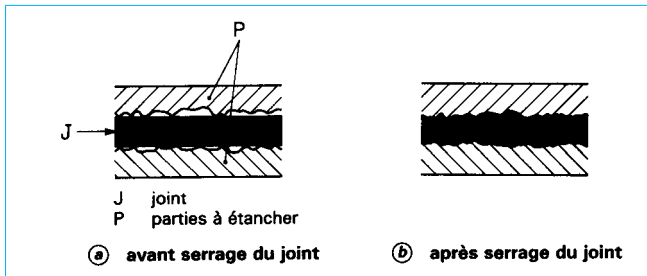


Figure 8 – Fonction d'un joint d'étanchéité

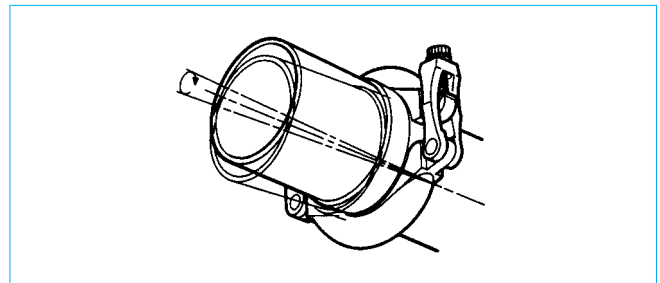


Figure 10 – Collier d'assemblage rapide

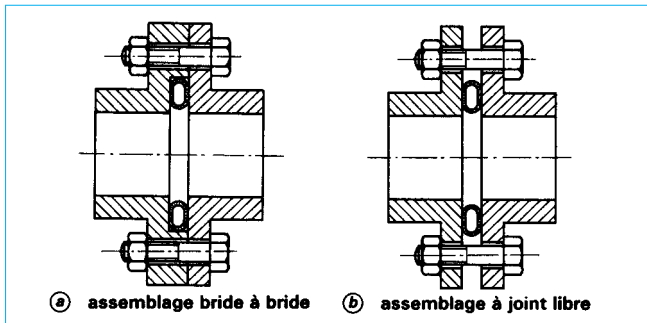


Figure 9 – Assemblage à brides boulonnées

par mètre ($N \cdot m^{-1}$), doit être le plus faible possible pour que le dispositif de serrage soit simple, peu encombrant et de coût réduit.

5.2.2.2 Dispositifs de jonction

Il existe de nombreux types de dispositifs de serrage, les plus répandus étant les brides avec leurs très nombreuses variantes.

Du point de vue du joint, il existe deux types de montage :

- **bride à bride** ; le joint est placé dans une gorge, ou avec une couronne de limitation d'écrasement en parallèle avec lui ; l'écrasement du joint à la mise en place est donc limité à une valeur prédéterminée, tout effort supplémentaire passe ensuite directement d'une bride à l'autre (figure 9a) ;

- **libre** ; le joint est simplement placé entre les deux brides à faces planes ; quel que soit l'effort, il transite uniquement par le joint (figure 9b).

La déformation de l'assemblage est un paramètre important, spécialement dans le deuxième montage, et l'étanchéité de l'assemblage ne dépendra pas uniquement des qualités du joint mais de l'ensemble.

Le premier montage (figure 9a) est intéressant car il ne nécessite pas de précautions spéciales au montage ; de plus, le joint est enfermé et les risques d'extrusion, ou simplement de fluage, sont limités. En revanche, il n'est plus possible d'augmenter le serrage en service, ce qui est faisable bien sûr avec le deuxième montage.

Le serrage des deux montages, lui-même, peut être assuré par tous les procédés connus : vis, boulons, collier (figure 10), serrage hydraulique et pneumatique, serrage thermique, etc.

5.2.2.3 Comportement d'une liaison d'étanchéité avec joint

Un joint n'a pas une caractéristique effort-écrasement linéaire, à température constante. En effet, sa caractéristique peut être considérée comme la somme d'une composante élastique, réversible, généralement linéaire et d'une composante plastique pratiquement irréversible (figure 11).

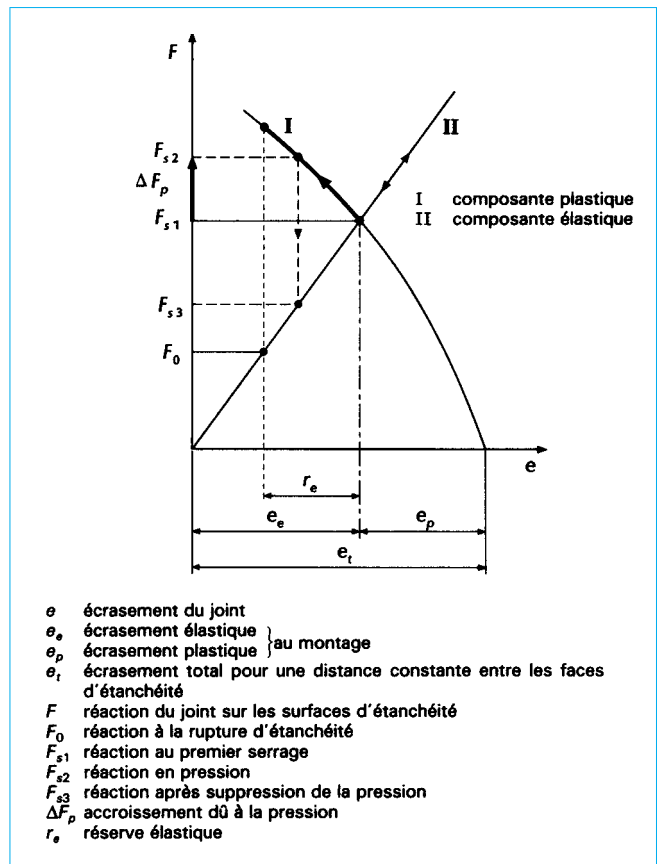


Figure 11 – Diagramme des deux composantes caractéristiques d'un joint d'étanchéité statique

Pour qu'un joint assure une étanchéité, avec une valeur minimale déterminée de fuite, il est nécessaire qu'il soit comprimé d'une certaine valeur, entre les deux surfaces à étancher, donc qu'elles exercent sur le joint deux effort égaux et symétriques F_1 ; le joint lui-même assure des réactions égales et opposées. Si une pression est mise dans l'assemblage, cette dernière va induire dans le joint de nouveaux efforts (figure 12) :

- une réaction radiale ΔF_r qui tend à chasser le joint vers l'extérieur (si la pression est intérieure) ;
- deux réactions axiales ΔF_p égales et symétriques qui s'ajoutent aux réactions dues au serrage initial ; ces réactions sont sensiblement proportionnelles à la pression.

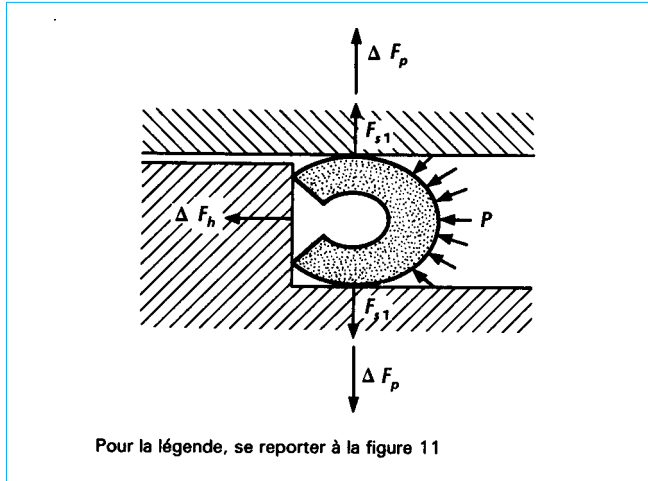


Figure 12 - Action de la pression P sur un joint comprimé : forces mises en jeu

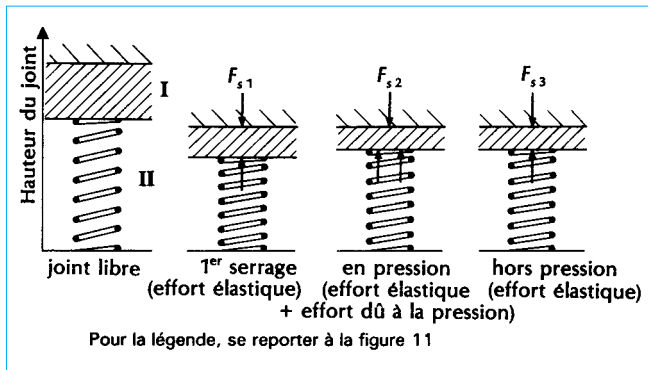


Figure 13 - Schématisation des deux composantes caractéristiques d'un joint d'étanchéité

La première mise en pression augmente donc le serrage du joint en assurant une plus grande *indentation* de la composante plastique ; elle est généralement favorable à l'étanchéité. Toutefois, cette augmentation de l'écrasement de la composante plastique va se traduire, après suppression de la pression, pour une même valeur de hauteur totale du joint, par une diminution des réactions du joint sur ses portées, réactions données par la composante élastique puisque cette partie sera moins écrasée (figure 13).

La figure 11 traduit ce résultat sur les caractéristiques décomposées d'un joint. Si les réactions sont inférieures à la valeur minimale assurant l'étanchéité demandée, il y aura fuite. Celle-ci peut être parfois éliminée par un resserrage, si l'assemblage n'est pas du type bride à bride.

Il est donc nécessaire que toute la réserve élastique ne soit pas consommée lors du premier serrage et même après mise en pression. En particulier, si la température augmente, la composante plastique va absorber plus d'élasticité par suite principalement du fluage. La possibilité de resserrage, si elle existe, risque alors d'être inefficace.

Plus cette réserve est grande, meilleure est la qualité du joint. La caractéristique générale d'un joint englobant ces deux composantes est donnée par la figure 14. Cette caractéristique varie en fonction de la température.

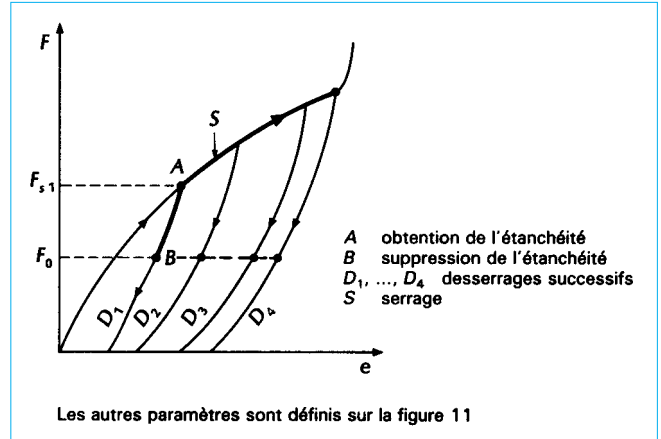


Figure 14 - Caractéristiques d'un joint d'étanchéité

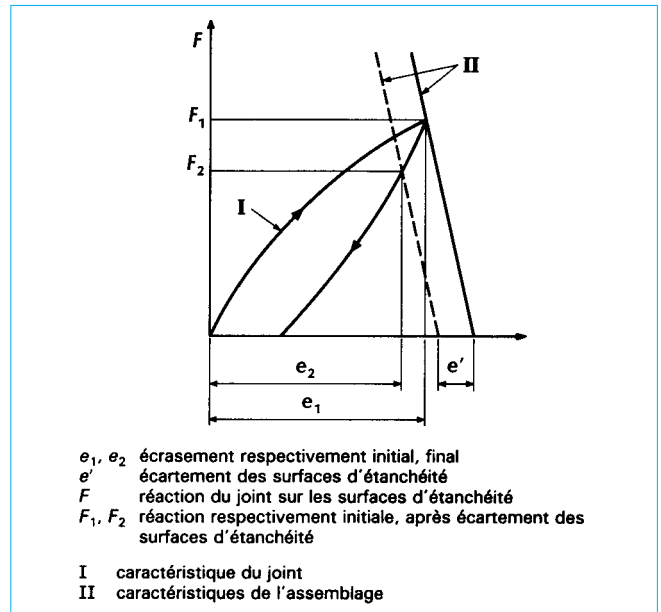


Figure 15 - Diagramme joint d'étanchéité - assemblage sous sollicitation

La liaison d'étanchéité est constituée par le joint et l'assemblage. Il faut donc aussi tenir compte de la caractéristique de déformation de ce dernier. Cette courbe est en principe une droite, l'assemblage étant calculé pour rester dans le domaine élastique. La conjugaison de la caractéristique de l'assemblage avec celle du joint permet d'étudier l'assemblage en étanchéité pour diverses sollicitations (figure 15).

Si des sollicitations tendent à éloigner les deux surfaces à étancher par suite de l'effort qu'elles engendrent dans le dispositif de maintien, le joint aura donc un écrasement moindre et sa réserve élastique devra lui permettre, malgré la réaction supplémentaire qui lui est associée, de maintenir une réaction totale suffisante pour assurer l'étanchéité (figure 15).

La température influe énormément sur les caractéristiques de la liaison. Les caractéristiques du joint et de l'assemblage diminuent beaucoup lorsque la température s'élève (souvent aussi lorsqu'elle

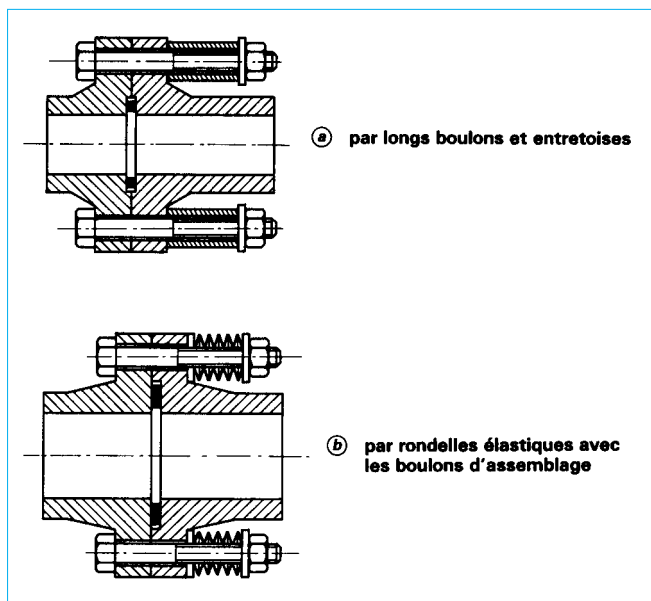


Figure 16 – Amélioration de la conservation de l'effort de serrage

diminue par rapport à l'ambiante). Il est possible d'améliorer la caractéristique de l'assemblage en lui permettant d'exercer un serrage relativement constant, par l'utilisation de boulons plus longs (figure 16a) ou par celle de rondelles élastiques (figure 16b).

Le phénomène de fluage, qui existe toujours plus ou moins dans un joint, se traduit d'ailleurs, à température ordinaire, par une diminution lente de l'effort de réaction sur les portées d'étanchéité après serrage d'un joint, mais qui arrive à se stabiliser. Cette baisse, avec certains types de joints (en élastomère), est peu sensible et ne dépasse pas quelques pour-cent. Elle peut être nettement plus élevée (jusqu'à 30 %) dans les joints métalliques ou dans les joints en plastiques composites. L'augmentation de température aggrave considérablement le fluage et souvent la stabilisation n'existe plus.

L'étude d'une liaison d'étanchéité est un problème complexe mais qui est soluble si l'on connaît bien les caractéristiques du joint et de l'assemblage sous les diverses sollicitations auxquelles ils sont soumis. Malheureusement, celles des joints sont souvent encore mal déterminées, ce qui rend le fonctionnement assez empirique.

5.2.2.4 Matériaux pour joints statiques

Les matériaux pour joints doivent posséder les meilleures qualités possibles (§ 5.2.2.1). Le produit de leur module d'élasticité E par leur résistance plastique σ_p doit être minimal, pour assurer une force de serrage faible, tout en possédant de plus une bonne résistance au fluage. Les matériaux doivent aussi être imperméables, au moins au fluide à étancher, et non agressés par lui aux températures extrêmes d'utilisation.

Des matériaux possèdent un assez faible module d'élasticité mais une résistance plastique assez élevée, pour d'autres c'est l'inverse. Dans de nombreux joints d'étanchéité, deux matériaux, voire plus, seront utilisés pour assurer des performances optimales : ce sont les joints composites, mais ils sont généralement plus onéreux que les joints mono-matériau.

Le nombre de matériaux utilisés pour réaliser des joints d'étanchéité est assez réduit ; ces matériaux appartiennent à des familles bien définies, surtout celles des élastomères, des matières plastiques et des métaux.

5.2.2.4.1 Élastomères

Les élastomères sont les matériaux qui possèdent, et de loin, le plus faible produit $E\sigma_p$. De plus, leur tenue au fluage est assez bonne et les différentes qualités font qu'il est presque toujours possible d'en trouver un qui convienne au fluide à étancher. Leur défaut est principalement une très légère perméabilité ; c'est pourquoi on ne les emploie que pour des dispositifs n'exigeant pas des taux de fuite inférieurs à 10^{-6} ou 10^{-7} Pa · m³ · s⁻¹. Par ailleurs, les élastomères les plus performants sont limités à une température de service en continu de 230 °C. De plus, ils présentent un certain vieillissement (mais des progrès importants permettent actuellement des durées de vie supérieures à 10 ans pour certains) et une variation de volume, le plus souvent positive, sous l'action du fluide à étancher, qui peut être gênante.

Malgré cela, les élastomères constituent les meilleurs matériaux d'étanchéité, conduisant à des efforts de serrage faibles, de l'ordre de $0,5 \times 10^3$ à 5×10^3 N · m⁻¹, sur des liaisons qui peuvent être très fortement sollicitées en pression ou en efforts divers.

De nombreuses familles d'élastomères sont utilisées en matériaux d'étanchéité, mais trois sont d'un emploi très fréquent :

- l'élastomère nitrile, très courant en mécanique, possédant une excellente tenue aux huiles minérales et de bas prix ;
- l'élastomère silicone, ayant une très bonne tenue à une plage élevée de température (de -70 à +300 °C en pointe), ayant une bonne résistance chimique, mais de prix nettement plus élevé ;
- les élastomères fluorés, les plus récents, ayant des qualités très complètes, une très grande inertie chimique, une gamme de températures d'utilisation étendue (-50 à +230 °C), mais de prix élevé.

Le tableau 3 donne les principales propriétés des élastomères utilisés dans 95 % des applications de l'étanchéité.

La caractéristique fondamentale d'un élastomère pour les joints d'étanchéité, outre sa famille, est la dureté. Une dureté importante (supérieure à 90 Shore) assure une meilleure résistance et sera utilisée pour des pressions élevées (supérieures à 20 MPa), mais l'effort de serrage sera plus important qu'avec une dureté moindre et surtout la rugosité R_a des surfaces devra être assez faible, par exemple inférieure à 1 µm.

Des propriétés intéressantes, mais secondaires, sont la déformation rémanente après compression et la résistance au gonflement en présence de liquides.

5.2.2.4.2 Matières plastiques

Deux familles de matières plastiques sont utilisées en matériaux pour joints d'étanchéité statiques :

- les **polyamides**, qui ont une très bonne résistance mécanique et qui sont assez inertes chimiquement ; ils ont un fluage modéré et sont de prix peu élevé ; leur tenue en température est très médiocre, inférieure à 100 °C ;
- les **PTFE** [poly (tétrafluoréthylène)], qui ont une très grande résistance aux produits chimiques dans une gamme étendue de température (-200 à +280 °C), mais qui ont un prix élevé et présentent un fluage important.

Ces matériaux, beaucoup plus durs que les élastomères (§ 5.2.2.4.1), nécessitent des pressions de serrage assez élevées, de l'ordre de 2×10^4 N · m⁻¹. Les surfaces à étancher doivent avoir une rugosité R_a faible, le plus souvent inférieure à 0,5 µm.

Leur imperméabilité est bonne et ils sont utilisés surtout pour les pressions très importantes (jusqu'à 50 Mpa), soit directement comme joint, soit comme auxiliaire avec les élastomères (bague anti-extrusion).

5.2.2.4.3 Métaux

On distingue deux catégories de métaux (tableau 4) :

- les **métaux mous**, essentiellement l'étain, le plomb, l'aluminium, voire le cuivre recuit, l'argent, l'or, l'indium (ce dernier pour les joints utilisés dans les techniques du vide) ;

Tableau 3 – Principaux élastomères utilisés en étanchéité

Famille d'élastomère	Désignations ASTM et ISO	Intervalle de dureté Shore	Température maximale en service °C	Température maximale de pointe °C	Applications	Inconvénients	Noms commerciaux
Butadiène acrylonitrile	NBR	40 à 95	- 30 à + 100	140	Produits pétroliers, liquides ou gazeux (huiles, carburants, graisses, butane, propane). Air comprimé. Eau froide. Eau chaude jusqu'à 80 °C. Très bonne résistance aux huiles minérales	Faible résistance aux déchirements	<i>Perbunan Hycar Bréon Butakon Elaprim Butacril Krynac</i>
Éthylène-propylène	EPDM EP, E/P	45 à 85	- 45 à + 150	170	Eau chaude et vapeur, jusqu'à 170 °C. Glycols. Produits chimiques minéraux, acides, bases. Résistance aux intempéries, à l'ozone. Tenue aux radiations	Très mauvaise tenue aux huiles	
Polychloroprène	CR	40 à 90	- 25 à + 100	120	Résistance aux intempéries, à l'ozone. Bonnes caractéristiques diélectriques	Résistance moyenne aux huiles et aux déchirements	<i>Néoprène</i>
Polyisobutylène	IIR, PIB	45 à 85	- 25 à + 100	130	Résistance aux intempéries. Faible perméabilité aux gaz	Faible résistance aux huiles et à la rupture	
Polyacrylique	ACM	60 à 75	- 10 à + 110	150	Huiles hypoides (additifs soufrés)	Très mauvaise résistance à l'eau et à la vapeur	
Poly(styrène/butadiène)	SBR S/B	30 à 95	- 40 à + 80	100	Bonne résistance à l'abrasion, aux déchirements et à la traction	Faible résistance aux huiles	
Silicone	VSI SI	40 à 80	- 80 à + 250	300	Résistance aux intempéries, à l'ozone. Résistance à l'air chaud. Applications alimentaires. Excellentes caractéristiques diélectriques	Faible résistance mécanique. Prix assez élevé. Faible perméabilité	
Silicone fluoré	FVMQ	60 à 80	- 50 à + 180	200	Résistance aux intempéries, à l'ozone. Résistance à l'air chaud. Bonne résistance aux produits pétroliers. Excellentes caractéristiques diélectriques	Assez faible perméabilité. Prix élevé	
Fluoré	FKM	65 à 85	- 20 à + 220	250	Acides forts et acides oxydants. Produits pétroliers, hydrocarbures aromatiques. Fluides hydrauliques ininflammables. Produits chimiques divers. Bonne tenue à la chaleur. Résistance exceptionnelle au fluage	Prix élevé	<i>Viton Fluorel Tecnoflon</i>
Polyuréthane	AU, EU, PUR	70 à 98	- 40 à + 80	100	Grande résistance à l'usure, à l'abrasion et à la coupure	Faible résistance à la chaleur et à l'humidité	<i>Vulkollan Urepan Adiprene Estane Desmopan</i>

— les **métaux durs** mais à fort coefficient d'élasticité, surtout le nickel et ses alliages, l'acier inoxydable, l'*Inconel*, etc.

Les premiers sont utilisés pour leurs propriétés de plasticité, mais ils fluent souvent facilement ; les seconds sont utilisés pour leur élasticité et leur bonne tenue aux températures élevées (ou très basses).

L'emploi des métaux conduit à des joints complètement imperméables, permettant des services à des températures extrêmes (800 °C et plus), mais les efforts de serrage sont toujours élevés nettement supérieurs à $10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ et nécessitent des surfaces avec une faible rugosité ($R_a = 0,4 \mu\text{m}$ au maximum). De plus, leur tenue sous de fortes sollicitations est difficile.

5.2.2.4.4 Autres matériaux

● **Amiante** : c'est une fibre très réfractaire qui n'est jamais utilisée seule mais surtout en association avec les élastomères, dont elle va augmenter la dureté, la résistance mécanique et la tenue au fluage. Associée à des métaux, pour constituer les joints métaloplastiques, elle permet d'en augmenter l'élasticité.

● **Cellulose** : sous forme de papier, souvent paraffiné, de carton plus ou moins évolué, elle est utilisée pour des joints surtout en contact avec les liquides dans des conditions modestes de pression et de température (10^5 Pa , 50 °C au maximum).

● **Carbone** : sous forme de fibres de graphite, parfois tissées, se présentant sous la forme d'un papier, il permet des utilisations à des températures élevées (600 °C et plus), avec une très bonne inertie chimique. Les joints sont relativement souples mais, du fait de leur structure, l'étanchéité est assez faible ($10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

● **Céramique** : également sous forme de fibres, elle permet une température d'utilisation très élevée (1 000 °C), une bonne résistance chimique mais une étanchéité semblable à celle donnée pour les fibres de carbone.

5.2.2.5 Formes des joints statiques

Il existe une quantité considérable de formes de joints statiques, ce qui prouve d'ailleurs que le choix du meilleur joint n'est pas évident.

Tableau 4 – Principaux métaux utilisés dans les joints statiques

Métal	Température limite °C			Tenue aux produits (1)											Appréciations Applications		
	matériau de structure	en revê- tement		NH ₃ liquide	CO ₂	Fioul Diesel	HCl	H ₂ liquide	Matière plastique fondue	HNO ₃	O ₂ liquide	H ₂ SO ₄	Eau déméralisée	Eau de mer		Vapeur	
Mou	Étain	- 50	80	150	A	B											Tenue assez correcte à la corrosion. Flue facilement. Domaine très limité en température
	Plomb	- 50	100	200	A	C	A	C	A		D	D	A	D	A	B	Flue facilement, tient mal en température. Tenue excellente avec les sulfates
	Aluminium	- 255	200	400	B	B		D	A		B	A		A	D	B	Tenue chimique acceptable avec des oxydants, produit à base de fluor
	Cuivre	- 255	300	450	D	C	A	D	A	C	D	A	C	D	B	A	Convient très bien au vide. Résistance chimique médiocre sauf quelques exceptions
	Argent	- 200	400	650		B	A	D	A	A	D	A	D		B	A	Très bonne tenue à des températures assez importantes. Bonne résistance chimique. Résistance au froid limitée
	Or	- 255		750		A	A	D	A	A	D	A	D		B	A	Très bonne résistance chimique. Gamme étendue de tenue aux températures positives et négatives
Dur	Fer		500		B	B		D	A		A	A	A	D			Peu utilisé, bonne tenue avec acide nitrique mais corrosion facile avec beaucoup de produits
	Nickel	- 200	700	850	B	B	A	C	A	A	C	A	C	A	C	A	Très bien à haute température et surtout bonne tenue à la corrosion
	Inconel		820		B	B	A	C	A	A	C	A	C		C	A	Bonne tenue à la corrosion et aux températures élevées
	Acier inoxydable austénitique		870		A	B	A	C	A	A	C	A	C	A	A	A	Bonne tenue à la corrosion (sauf avec les chlorures) et à température élevée, dépend de la nuance

(1) A bon ; B moyen ; C faible ; D à interdire.

Certains présentent un intérêt particulier et doivent être choisis de préférence.

Pour une forme bien étudiée, il est possible d'améliorer la courbe caractéristique d'un joint d'étanchéité statique, en particulier de lui donner une meilleure composante élastique. Si deux matériaux sont utilisés (joints composites), on fait remplir à chacun la fonction pour laquelle il est le mieux adapté, par exemple plasticité pour un matériau mou, élasticité pour un matériau à résistance élevée.

5.2.2.5.1 Joints plats

Ce sont les plus simples. Découpés dans une feuille, ils peuvent avoir une surface quelconque.

Ces joints sont réalisés en élastomère ou en élastomère-amianté (le plus utilisé), en matière plastique, en composé métaloplastique de différentes réalisations (figure 17) et en feuille de métaux.

Ce type de joint n'est pas très intéressant, sauf pour les surfaces à étancher compliquées. En général, il vaut mieux lui préférer le joint torique.

La largeur du joint ne doit pas être trop importante, les constructeurs donnent toutes précisions à ce sujet.

Il y a toujours intérêt à prévoir un serrage précis, qui nécessite au minimum l'utilisation de la clé dynamométrique ou un montage avec écrasement sur butée.

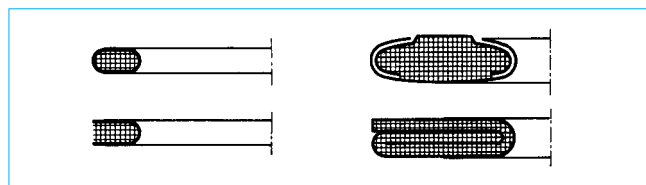


Figure 17 – Joints plats métaloplastiques

5.2.2.5.2 Joints toriques

Un joint torique est un anneau de section généralement circulaire. L'élastomère est le matériau le plus courant pour sa confection. Ce joint présente de nombreux avantages : faible encombrement, effort de serrage très faible, autoétanchéité. En effet, la pression qui s'exerce sur ce type de joint tend à lui donner une forme qui renforce son contact sur les surfaces à étancher.

Sa fabrication en grande série, en des dimensions très variées, et son faible prix en font le joint statique par excellence.

Plusieurs montages sont possibles, donnés par la figure 18.

Le montage en angle (figure 18a) ou avec trois points de contact est intéressant, mais il est nécessaire de bien respecter les cotes d'usinage, en particulier de la partie oblique.

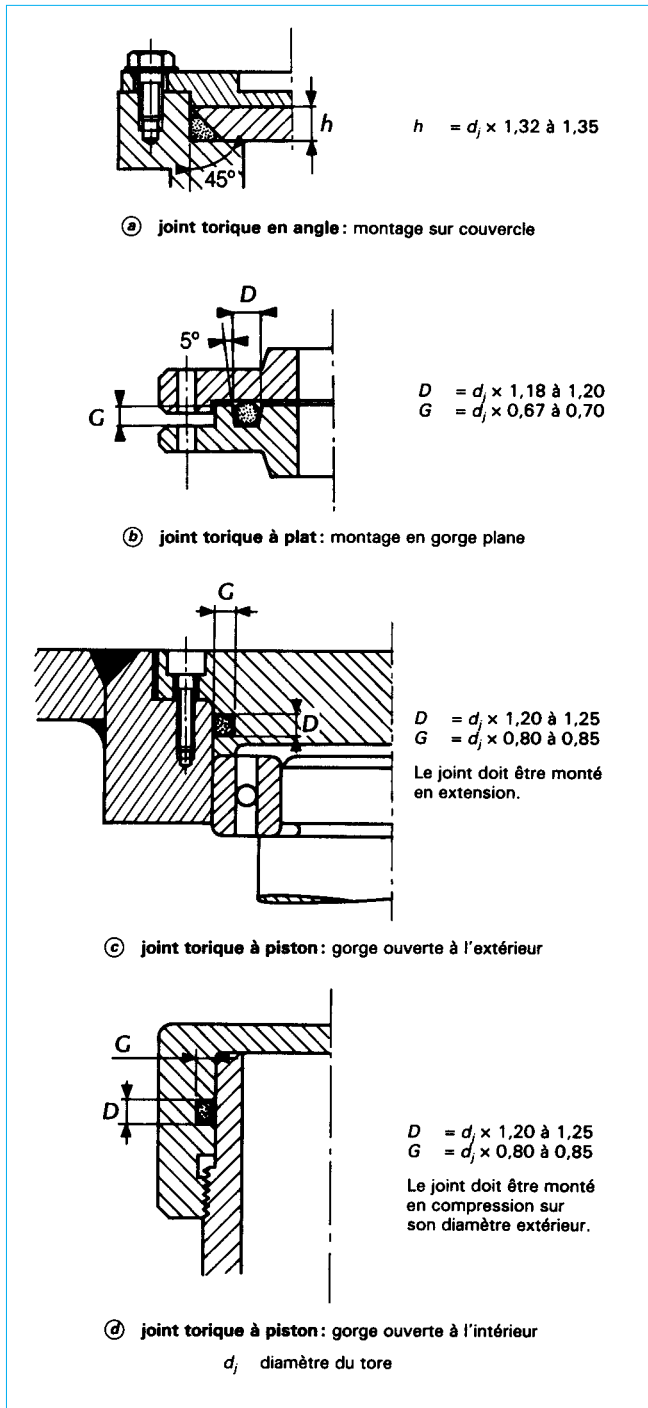


Figure 18 – Montages de joints toriques

Le montage en gorge plane (figure 18b) est universel et permet des pressions très élevées.

Le montage en piston (figure 18c et d) présente quelques inconvénients. Par suite du jeu nécessaire au montage, il peut y avoir risque d'extrusion du joint, la pression est donc limitée aux environs

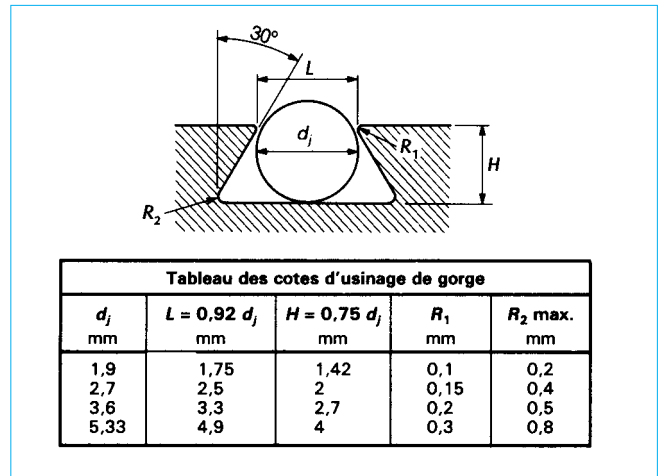


Figure 19 – Montage d'un joint torique dans une gorge trapézoïdale

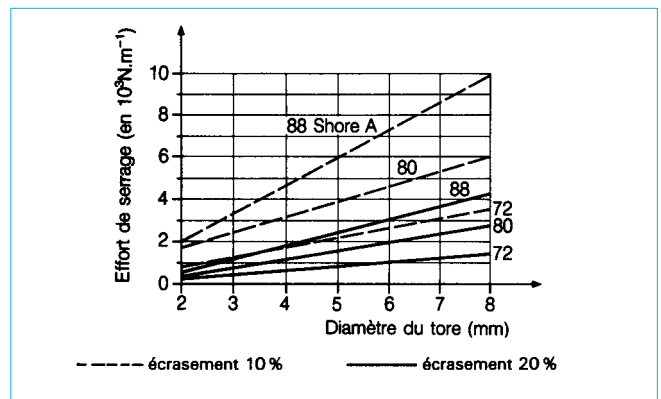


Figure 20 – Effort d'écrasement linéaire d'un joint torique en élastomère NBR

de 20 MPa. De plus, un chanfrein d'entrée est nécessaire pour éviter une blessure du joint au montage.

Il est possible de réaliser une gorge trapézoïdale qui permet de maintenir le joint au montage. Les dimensions sont celles de la figure 19. Les efforts d'écrasement sont donnés par la figure 20.

Les rugosités de surface R_a sont comprises entre 0,6 et 1,6 μm suivant la dureté de l'élastomère, un élastomère dur nécessitant la rugosité la plus faible.

Il existe aussi des joints toriques métalliques (figure 21). Certains sont creux, la paroi du tore mince assure une relative élasticité. Parfois des trous, côté pression, permettent à cette dernière de venir renforcer l'effort de serrage initial. D'autres contiennent un gaz sous pression qui, sous l'effet de la température, se dilate et augmente l'effet de la pression à étancher.

Ces joints nécessitent un état de surface R_a très fin, de rugosité inférieure à 0,2 μm . Ils reçoivent souvent un revêtement extérieur en métal mou. Leur utilisation, surtout pour des températures supérieures à 200 °C, est délicate, les conditions de montage, propreté et valeur de l'effort de serrage, étant très strictes.

Des joints toriques métalliques massifs à section circulaire ou ovoïde (figure 22) sont aussi utilisés mais avec des gorges trapézoïdales. Le rapprochement des gorges au serrage assure une pression très élevée entre joint et surface, et l'étanchéité obtenue est

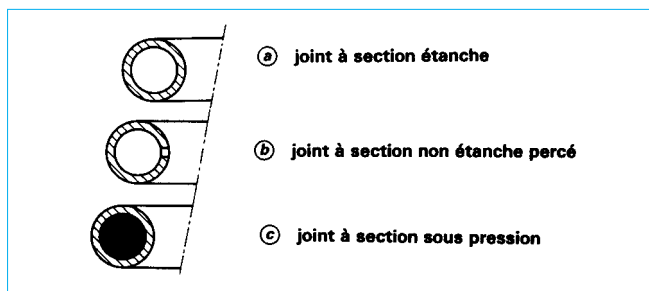


Figure 21 – Joints toriques métalliques creux

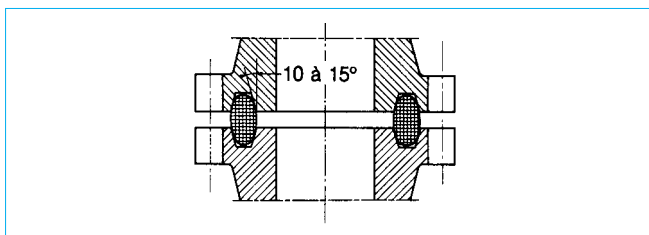


Figure 22 – Joint métallique massif torique à section ovoïde

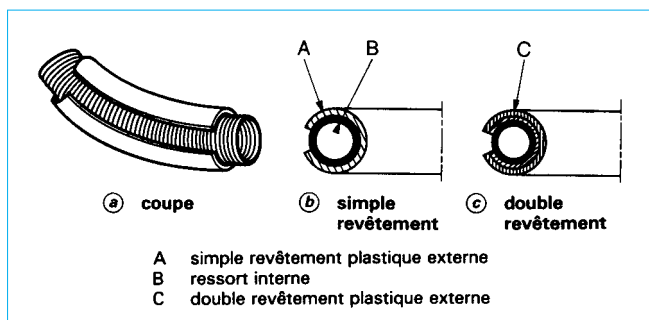


Figure 23 – Joint métallique composite à ressort (d'après doc. Céfilac)

assez bonne, même avec des états de surface nettement moins fins que pour les joints toriques métalliques creux. Enfin, il existe un joint torique composite intéressant, dont le corps central est un ressort hélicoïdal à spires jointives fermé sur lui-même, enveloppé extérieurement d'une feuille métallique (joint *Hélicoflex* de Céfilac ; figure 23). Le ressort assure une bonne élasticité, l'enveloppe extérieure donne la plasticité, qui peut être améliorée par l'utilisation de deux feuilles l'une sur l'autre, la plus extérieure étant la plus plastique. Le ressort est réalisé avec un fil d'acier inoxydable austénitique, en *Monel*, *Inconel* ou *Nimonic* suivant la température d'utilisation qui peut aller jusqu'à 800 °C.

Les revêtements extérieurs sont :

- le plomb, l'étain ou l'indium avec des rugosités de surface R_a comprises entre 0,1 et 1,6 μm pour la température ambiante (20 à 30 °C) ;
- l'aluminium très courant, jusqu'à 250 °C, la rugosité R_a doit être comprise entre 0,8 et 12,5 μm ;
- l'argent et le cuivre ; la rugosité R_a doit être comprise entre 0,2 et 6,3 μm , jusqu'à la température de 400 °C ;
- le nickel et l'acier inoxydable ; la rugosité R_a doit être comprise entre 0,1 et 3,2 μm , jusqu'à la température de 700 °C.

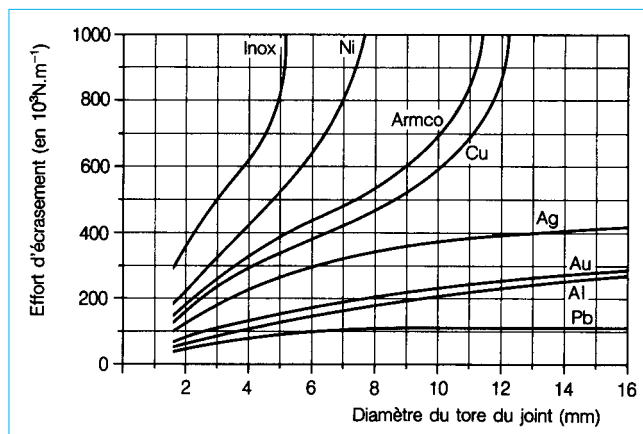
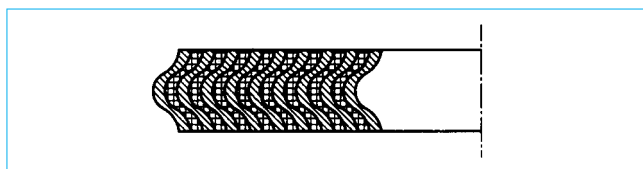
Figure 24 – Effort d'écrasement d'un joint métallique composite à ressort (joint *Hélicoflex*)

Figure 25 – Joint métaloplastique chevron

La fuite peut être inférieure à $10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. L'effort de serrage est assez important, mais inférieur à celui de beaucoup d'autres joints métalliques. Un ordre de grandeur est donné sur la figure 24 en fonction de la nature du revêtement extérieur et du diamètre du tore. L'élasticité est de l'ordre de 10 % du diamètre de la section du joint.

5.2.2.5.3 Joints de formes diverses

• **Joint chevron** (figure 25) ou **joint spiral** : il s'agit d'un joint réalisé à partir d'une section en chevron enroulée en spirale et intercalant un ruban, généralement d'amiante. La forme en V et la présence d'un matériau assez tendre assurent une certaine élasticité. Ce joint, qui permet d'assurer l'étanchéité à des pressions élevées (20 MPa et plus), nécessite un effort de serrage très grand (5×10^5 à $10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$).

• **Joint lettre** (figure 26) : la section usinée a des formes variées reproduisant certaines lettres de l'alphabet (C, K, U, V, X, etc.). Ces joints possèdent une petite élasticité et les parties en contact avec les surfaces à étancher reçoivent souvent un dépôt de métal mou. Ces joints sont très chers et peu intéressants.

• **Joint métaloplastique ondulé** (figure 27) : pour assurer une meilleure élasticité, la section du joint est ondulée. L'étanchéité est assez bonne avec les liquides, faible avec les gaz.

• **Joint couteaux** : il en existe deux variantes. Le joint peut posséder des surfaces de formes très aiguës pour celles qui vont assurer l'étanchéité (figure 28), ou bien ce sont les surfaces à étancher qui vont présenter des formes aiguës (couteaux de formes variées figure 29), et venir s'imprégner dans le joint plus tendre. Les matériaux utilisés sont le cuivre, l'aluminium, le nickel, voire l'or ou l'argent. Ce type de joint est assez courant dans les installations de grand vide.

• **Joint conique** : ce joint a une section en tronc de cône, d'épaisseur relativement faible (1 à 3 ou 4 mm), en acier inoxydable (*Monel*, *Inconel*) et en aluminium (dans le cas des très basses températures). Il est placé dans un logement en forme de double V

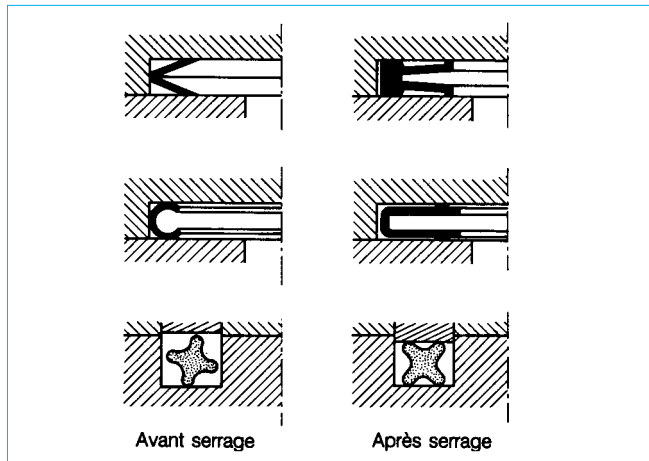


Figure 26 – Joints métalliques en forme de lettres

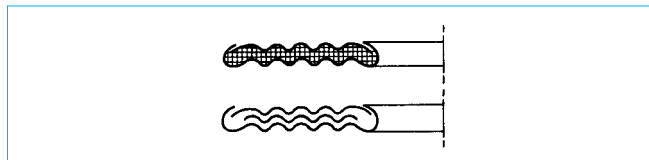


Figure 27 – Joints métalloplastiques ondulés

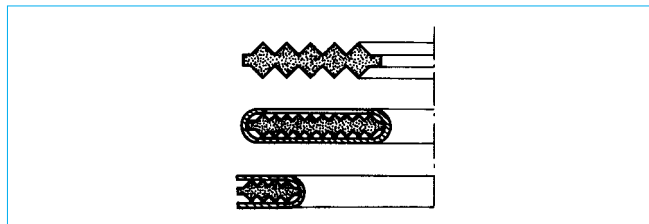


Figure 28 – Joints couteaux

(figure 30). Une variante très intéressante (figure 31) utilise une forme tronconique légèrement ondulée, le logement est asymétrique.

Les efforts de serrage sont relativement modérés pour un joint métallique tout en assurant une excellente étanchéité (fuite inférieure à $10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), sous très forte pression ou sous grand vide, malgré des sollicitations thermiques importantes.

- **Joint à élasticité induite** (figure 32) : il est constitué par deux rondelles métalliques entre lesquelles est placé un métal relativement mou d'épaisseur un peu supérieure à celle des rondelles. Le serrage assure une déformation élastique radiale des rondelles dès que ce métal mou est comprimé et ramené à l'épaisseur des rondelles. Plusieurs variantes de réalisation existent. Sa restitution élastique reste toutefois assez faible.

5.2.2.5.4 Joint gonflable

Ce joint a la forme d'un boudin creux en élastomère muni d'une valve par laquelle peut être injecté un gaz sous pression, qui va faire augmenter sa dimension et le faire s'appliquer sur la deuxième surface à étancher (figure 33). Sa section a des formes variables. Sa décompression assure la suppression du contact, ce qui permet des démontages faciles. Ce type de joint n'assure

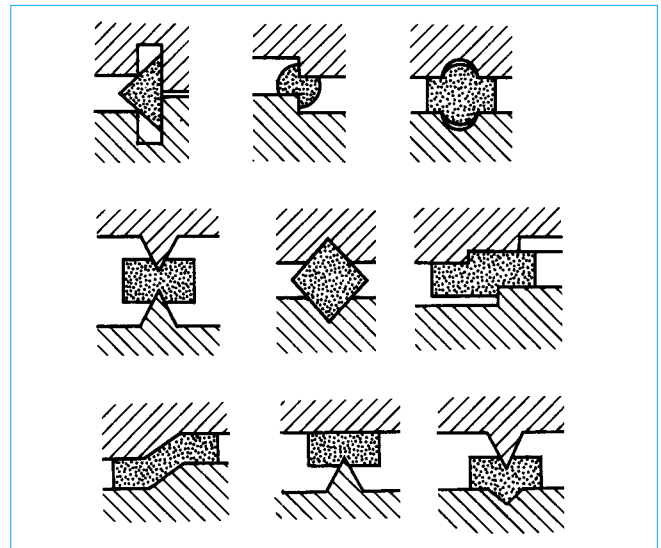


Figure 29 – Surfaces d'étanchéité type couteaux

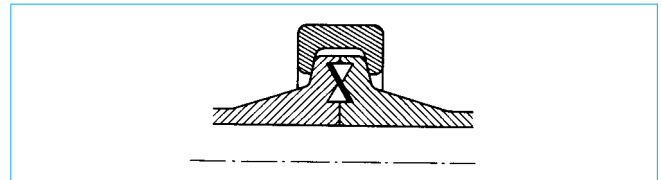


Figure 30 – Joint conique

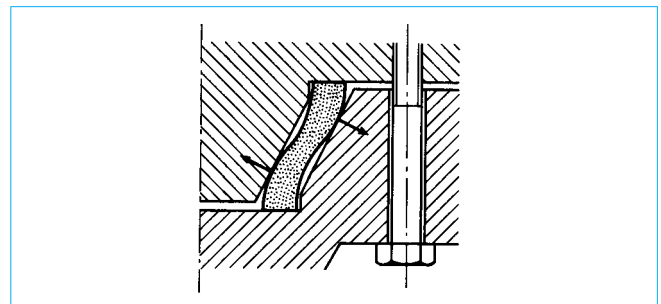


Figure 31 – Joint conique en S

cependant pas de très grandes étanchéités, ni des pressions élevées (quelques 10^5 Pa au plus).

5.2.2.5.5 Conclusion

Le tableau 5 résume les différents types de joints d'étanchéité statique les plus intéressants avec leurs principales caractéristiques.

5.2.2.6 Difficultés rencontrées

Les fuites que l'on constate dans les dispositifs comportant des joints statiques se manifestent de deux manières différentes en fonction du temps :

- la fuite a lieu immédiatement lors de la mise en service, ou après un remontage ;
- la fuite apparaît après un certain temps de fonctionnement.

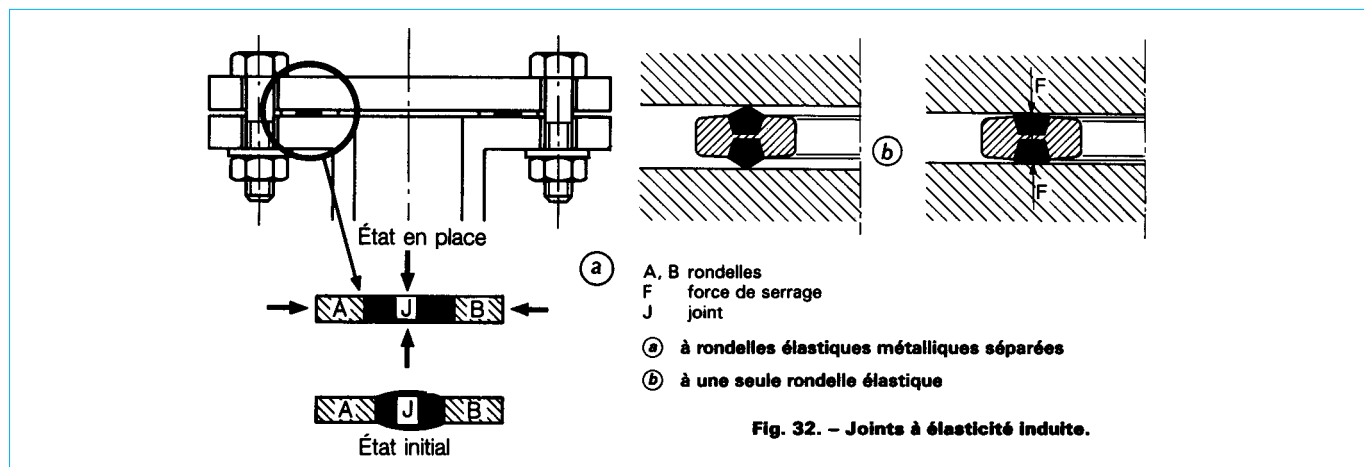


Fig. 32. – Joints à élasticité induite.

Figure 32 – Joints à élasticité induite

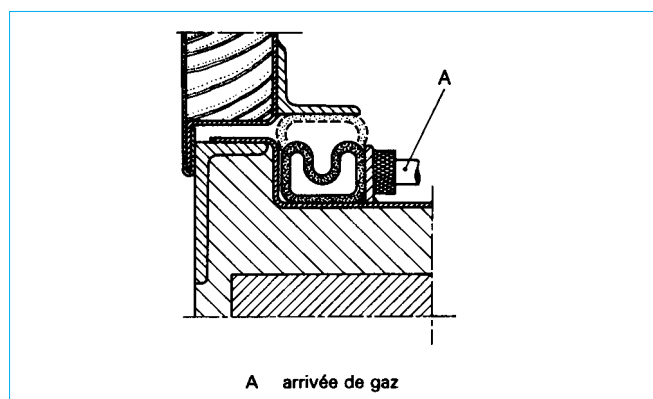


Figure 33 – Joint gonflable

Il existe des causes communes à l'apparition de ces deux types de fuites, mais certaines sont bien particulières à chacun.

5.2.2.6.1 Fuite dès la mise en service

Les causes peuvent être dues à :

- un mauvais choix du joint ;
- une agression chimique du matériau du joint par le fluide ;
- une détérioration du matériau du joint par la température trop haute, ou trop basse du fluide.

Toutefois, la fuite peut n'apparaître qu'au bout d'un certain temps, à moins que le matériau ait été très mal choisi :

- **perméabilité trop grande** : cela est surtout le cas avec le vide ou avec des gaz très légers (hélium, hydrogène entre autres) ;
- **plasticité insuffisante** : c'est une cause fréquente de fuite immédiate, surtout avec les gaz.

Les micro-déformations sont alors mal comblées : **liaison mal adaptée**. On distingue les causes suivantes :

- *rugosité trop importante des surfaces en contact avec le joint* ;
- *rayures radiales accidentelles* qui constituent un chemin de fuite direct ; ces rayures peuvent être dues à des coups d'outils ou

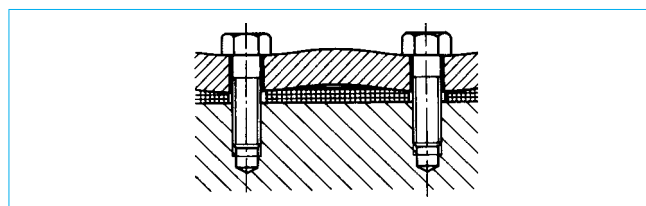


Figure 34 – Cause de fuite par serrage non uniforme

à des chocs lors de la fabrication ou lors du montage ; c'est une cause très fréquente ;

– *serrage insuffisant* (ou parfois trop important) et souvent irrégulier du joint ; il est indispensable que les organes de serrage assurent une pression linéaire constante ; ainsi, sur la figure 34, les boulons sont très éloignés et les surfaces à assembler se gauchissent, entraînant une fuite entre chacun d'eux ;

– *encastrement du joint insuffisant* : si sa résistance radiale est trop faible, il peut y avoir rupture du joint en extrusion, en particulier avec les élastomères, les matières plastiques, ou les métaux purs les plus mous ;

– *mauvais montage* : c'est aussi une cause fréquente de fuite. Le joint peut être *blessé* au moment du montage. En particulier avec les joints en élastomère, il est très important d'avoir des chanfreins d'entrée bien faits ; il ne faut pas faire passer le joint à force sur des filetages ou des trous, surtout si ces derniers sont mal chanfreinés ; il faut aussi veiller à n'introduire ni copeaux, ni particules, qui sont des sources importantes de fuites. Les surfaces à étancher doivent être propres, le plus souvent dégraissées, car nombre d'huiles ou de graisses attaquent certains matériaux de joints.

Ces cas de montages défectueux de joints se rencontrent souvent lorsque le joint travaille dans un plan horizontal et lorsqu'il doit être placé au préalable (ce qui est toutefois rare) dans la partie supérieure. Il y a lieu alors de trouver une solution pour bien le positionner et le fixer. C'est la raison de l'utilisation des gorges trapézoïdales avec les joints toriques en élastomères (figure 19).

De très nombreux joints, surtout les joints métalliques, ne peuvent guère servir plusieurs fois. Les joints en élastomère peuvent être réutilisés un assez grand nombre de fois, à condition que leur durée de vie ne dépasse pas 3 à 10 ans, suivant les qualités.

On remarque aussi des défauts d'étanchéité lorsqu'un joint en élastomère est remonté rapidement (de l'ordre de quelques minutes à une heure), et s'il a été comprimé pendant un temps assez

Tableau 5 – Joints les plus importants pour les étanchéités statiques (1)

Forme de la section ou type	Schéma	Matériau	Force de serrage Ordre de grandeur en $10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$	Température limite d'utilisation °C	Caractéristiques générales	Remarques Applications principales
Torique (§ 5.2.2.5.2)	circulaire plein	Élastomère Matière plastique (PTFE)	1 à 5	250	Simple, peu encombrant, prix faible, autoétanche Bonne résistance aux produits	Joint universel, gaz ou liquide. Usinage moyen des surfaces.
			10 à 30	300		
	circulaire creux	Métal avec revêtement mou	100 à 350	600	Coûteux, usinage très soigné des surfaces	Plutôt pour liquide
	composite à ressort	Ressort acier, enveloppe métal plus ou moins mou	80 à 1 000	700	Bonne reprise élastique, usinage des surfaces moyen, prix moyen	Pour gaz ou liquide, sollicitations assez importantes, très bonne étanchéité
	ovale	Métal (gorges en V)	200 à 600	400	Reprise élastique faible, usinage des surfaces moyen	Surtout gaz, bonne étanchéité, brides épaisses
Plat (§ 5.2.2.5.1)	rectangulaire	Élastomère. Élastomère-amiante. Matière plastique (PTFE). Métal mou	5 à 20	250	Peu coûteux, bonne reprise élastique. Peu coûteux, peu de fluage. Risque de fluage, inertie chimique. Risque de fluage, peu coûteux.	Pour formes compliquées, gaz et liquide. Surtout pour liquide peu agressif. Liquide agressif. Risque de fluage, pression moyenne
			30 à 200	350		
	métallo-plastique	Métal-amiante	100 à 400	300		
			200 à 400	500	Assez souple, prix assez faible	Étanchéité moyenne
À indentation (§ 5.2.2.5.3)		Métal plus ou moins mou	100 à 400	200	Nécessite un usinage de bride très fin ou compliqué, prix assez faible, reprise élastique faible	Très bonne étanchéité, pour vide élevé, non réutilisable
Conique (§ 5.2.2.5.3)		Métal	150 à 400	800	Bride pas trop épaisse, prix moyen, assez bonne reprise élastique	Très bonne étanchéité sous sollicitations importantes, forte pression, faible température
Gonflable (§ 5.2.2.5.4)		Élastomère	0	200	Appui effaçable à distance, pression d'appui variable	Étanchéité médiocre, aucun effort au mouvement de mise en place

(1) Les valeurs numériques correspondent aux cas les plus fréquents. Des valeurs supérieures peuvent parfois être obtenues.

long (de l'ordre du mois). Il faut dans ce cas lui permettre de reprendre sa réserve élastique.

Quant aux joints métalliques, seuls quelques rares types peuvent être réutilisés, une dizaine de fois, tout au plus.

Lorsqu'un joint statique fuit immédiatement à la mise en service, les causes principales doivent donc être recherchées le plus souvent en examinant si le montage a été correct, si les surfaces à assembler sont propres, assez finement usinées et sans rayure radiale ou trace de coups. Enfin, on doit vérifier si le serrage est suffisant et bien réparti. Tout cela constitue 90 % des causes d'échecs d'étanchéité statique.

5.2.2.6.2 Fuite en cours de fonctionnement

On suppose d'abord, évidemment, que les causes précédentes n'existent pas puisque le joint a une étanchéité correcte à la mise en service.

Dans ce cas, on retrouve les causes suivantes.

– **mauvais choix du joint** : les causes précédentes (§ 5.2.2.6.1), agressions chimiques, action de la température, résultent d'un mauvais choix du matériau du joint ou d'une durée de vie trop grande.

Une autre cause très importante de fuite est liée au phénomène de fluage du matériau du joint. Les métaux mous y sont particulièrement sensibles. La pression d'application du joint sur les surfaces à étancher diminue lentement dans le temps et, à partir d'une certaine valeur, une fuite apparaît ;

– **liaison mal conçue** : il s'agit ici essentiellement de la rigidité des surfaces à étancher et de celle des organes de fixation, souvent le boulonnage. Les diverses sollicitations, variables dans le temps, risquent d'entraîner des déformations plastiques, d'où une pression de serrage insuffisante et irrégulière sur le joint (réserve élastique trop faible du joint). Les variations importantes de pression, mais surtout de température, sont une des sources principales de défauts

d'étanchéité dans le temps. Les défauts peuvent aussi avoir pour origine une trop grande différence dans les coefficients de dilatation entre le joint et les matériaux de la jonction ;

— **réutilisation des joints** : sauf avec les élastomères, c'est aussi une cause non négligeable de fuite en cours de service ; le joint a été fatigué, ou les surfaces d'appui ont été marquées par le montage précédent. Il est quelquefois nécessaire, pour assurer une étanchéité à la remise en route correcte, d'opérer un serrage plus important, d'où un risque de fluage du joint ou de déformation prohibitive de la jonction.

Dans le cas de fuites en service, les causes doivent être recherchées principalement dans un joint mal adapté qui va fluer, ou dans un serrage trop important, en tous cas incompatible avec la résistance de la liaison.

Les sollicitations en pression et surtout en température sont, de loin, les causes principales de fuite en service.

5.2.2.6.3 Conclusion

En résumé, un joint d'étanchéité statique ne peut donner satisfaction que si, non seulement il a été bien choisi en fonction du fluide à étancher, de sa température et de sa pression, mais aussi si son appui est correct, son montage bien fait, les surfaces à assembler lisses et propres et le serrage convenable. Il est le plus souvent important de serrer les vis et les boulons à l'aide de clés dynamométriques ou même mieux, si ces pièces sont de gros diamètre, par traction contrôlée et d'une manière progressive et symétrique.

5.2.2.7 Produits d'étanchéité

Il existe des produits qui, tout en n'étant pas des joints, permettent de rendre étanche l'assemblage de deux surfaces sans d'ailleurs qu'elles aient de très bonne qualité de rugosité.

Ces produits se présentent sous forme d'une pâte, plus ou moins visqueuse, que l'on étale sur l'une, voire les deux surfaces à réunir et qui va adhérer fortement aux surfaces et durcir après assemblage. Cette pâte comble les rugosités et élimine les chemins de fuite.

Il existe de nombreux produits d'étanchéité, qui peuvent se diviser en deux grandes familles :

- ceux à un seul composant, tels que les résines anaérobies, par exemple la *Loctite*, qui se polymérisent à l'abri de l'air, ou d'autres résines dont le durcissement a lieu par chauffage ou par action de l'humidité ; les premières sont actuellement très utilisées ;
- ceux à deux composants, dont l'un assure la polymérisation, tels que les résines *Epikote (Araldite)*, et les produits silicones ; ces derniers assurent une liaison souple mais peu résistante à la pression (inférieure à 1 MPa).

Les produits d'étanchéité, simples d'emploi, nécessitent toujours, pour être efficaces, un nettoyage et surtout un dégraissage parfaits des surfaces. Ils donnent des liaisons indémontables (sauf par la chaleur ou par certains solvants). L'étanchéité obtenue est très bonne, mais il ne faut pas des sollicitations mécaniques trop violentes sur la liaison et les températures de service doivent rester assez faibles (environ 80 °C au maximum).

Leur utilisation est assez fréquente dans l'assemblage d'organes étanches à partir d'éléments qui ne seront plus démontés.

5.2.2.8 Étanchéité aux liaisons filetées et tubes

Les assemblages par filetage ne sont, en pratique, pas étanches avec les liquides, sauf le filetage NPT (National Pipe Taper) dit aussi Briggs.

Pour assurer une étanchéité, plusieurs solutions existent :

- utilisation d'un joint, en particulier de rondelles spéciales avec un revêtement interne en élastomère [bague BS (Bonded Scal), figure 35] ; il faut remarquer qu'il est toujours déconseillé de venir

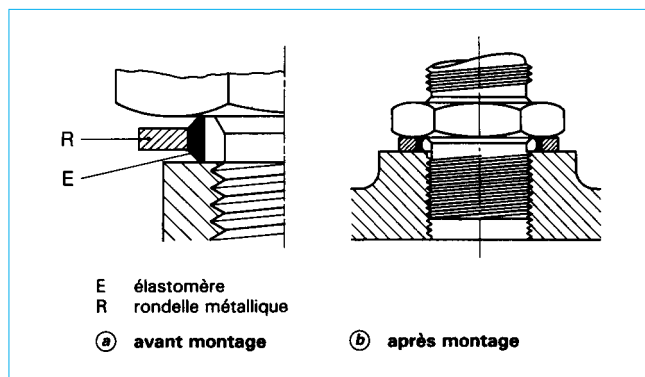


Figure 35 – Bague d'étanchéité type BS

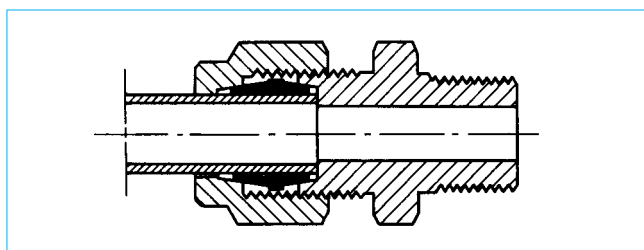


Figure 36 – Raccord de tube double-cône

plaquer la surface à étancher sur un joint par rotation car il risque d'être détérioré et l'étanchéité en est souvent affectée ;

- utilisation d'un produit d'étanchéité donné au paragraphe 5.2.2.7 ;
- utilisation d'un ruban d'étanchéité en PTFE, de faible épaisseur (0,1 mm environ), que l'on vient enrouler autour de la partie mâle du filetage (généralement en 2 ou 3 couches) ; l'étanchéité est bonne et le démontage très facile ; de plus, par suite des caractéristiques du PTFE, la température peut atteindre 250 °C et il n'y a aucune agressivité, quel que soit le fluide.

Pour raccorder des tubes en étanchéité, il existe de nombreux types de raccords qui donnent en général satisfaction. Le plus répandu utilise une bague biconique en métal plus dur que celui des tubes (figure 36) qui vient se serrer dans chacune des extrémités des tubes. Toutefois, pour des étanchéités très grandes avec les gaz, ces dispositifs ne doivent être utilisés que pour de petits diamètres (jusqu'à 20 mm environ). Au-delà, l'utilisation de joints est recommandée.

5.2.2.9 Traversées électriques étanches

La traversée en étanchéité à travers une paroi de conducteurs électriques pose des problèmes particuliers, surtout si cette étanchéité doit être excellente, ce qui est souvent le cas. La principale difficulté est celle de l'isolation électrique, les conducteurs pouvant être sous des tensions élevées.

Le plus souvent, des traversées spéciales couramment commercialisées se composent d'un isolant en verre fritté, ou en céramique, serti dans un corps métallique, les conducteurs traversant cet isolant. Le corps métallique est soudé, ou brasé, sur la paroi à traverser (figure 37).

De telles traversées électriques résistent à des pressions élevées qui, pour des diamètres de 20 ou 30 mm, atteignent 50 MPa. Leur tenue en température, jusqu'à 200 °C, est bonne, à condition toutefois de limiter les chocs thermiques. C'est en effet le point

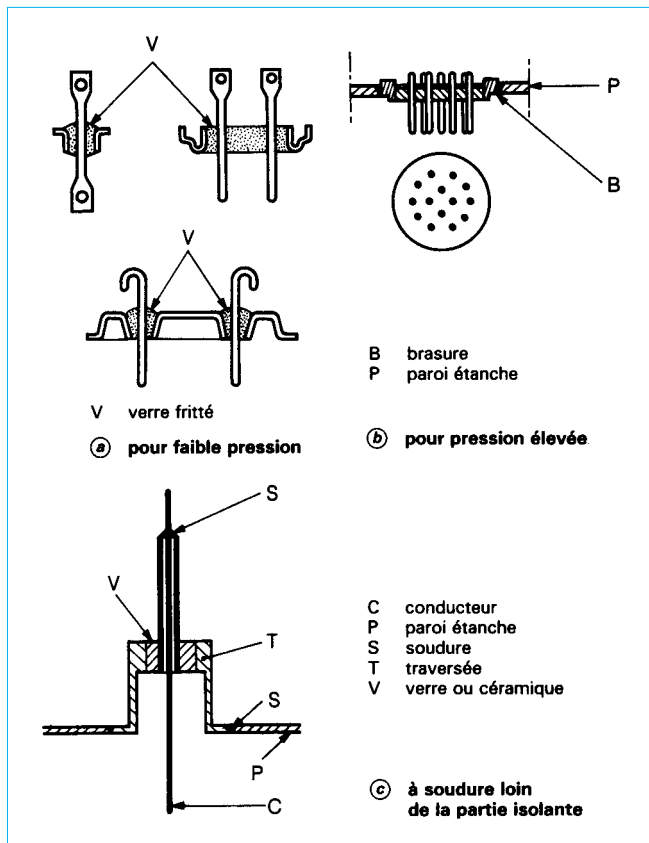


Figure 37 – Traversées électriques étanches

délicat ; de même, au montage, il faut éviter tout échauffement brusque de l'isolant, ce qui est fait par exemple dans la traversée de la figure 37c, par l'éloignement de la soudure de la partie isolante frittée.

6. Étanchéité aux liaisons dynamiques en translation

L'étanchéité des surfaces en mouvement relatif doit, le plus généralement, être obtenue aussi bien à l'arrêt que quelle que soit la vitesse de déplacement de ces surfaces, en n'étant la source que d'efforts les plus réduits possible.

6.1 Étanchéité rigoureuse

6.1.1 Par déformation

Un organe souple, métallique, facilement déformable est soudé, ou brasé, sur chacune des surfaces mobile et fixe. Il s'ensuit un effort de déplacement qui est généralement proportionnel à la course.

Une première solution consiste à utiliser une **membrane** de faible épaisseur, de quelques centièmes à un ou deux dixièmes de millimètre, généralement ondulée pour lui donner une plus grande

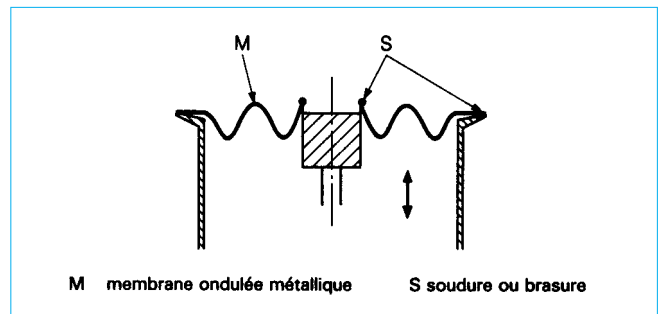


Figure 38 – Étanchéité par membrane métallique déformable

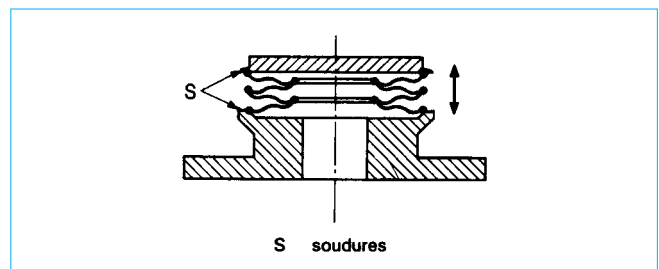


Figure 39 – Étanchéité par soufflet à disques soudés

flexibilité (figure 38). La course est très réduite, de l'ordre du millimètre, ainsi que les pressions possibles, de l'ordre de quelques fractions de mégapascal. Une membrane seule est assez rarement utilisée.

La seconde solution met en œuvre les soufflets métalliques dont il existe deux types.

- **Soufflets à disques soudés** (figure 39) : par empilement des membranes précédentes (figure 38), les courses s'ajoutent. Il est alors possible d'avoir des déplacements de plusieurs millimètres, voire plusieurs centimètres. Les pressions d'utilisation restent faibles, du même ordre que les précédentes. Le coût est élevé. On les utilise principalement dans le vide et dans certains appareils de mesure.

- **Soufflets onduleux** : ils acceptent des pressions beaucoup plus élevées (jusqu'à 10 MPa pour les petits diamètres pouvant atteindre 10 mm environ). Leur raideur est nettement plus élevée que les précédents ainsi que leur encombrement (rapport course sur longueur initiale de l'ordre de 0,2 contre 1, voire 4 pour les disques soudés). Leur utilisation est très courante dans de nombreux appareils de mesure ou de régulation, sur des robinets (figure 40), des tuyauteries, etc.

6.1.2 Par l'intermédiaire d'un champ magnétique

Si l'une des pièces est magnétique et si l'autre est munie d'un aimant ou d'un électroaimant, le déplacement de l'une provoquera le déplacement de l'autre, une cloison amagnétique, qui assure l'étanchéité, étant placée entre les deux. Il faut remarquer que l'entraînement ne possède pas une très grande rigidité mais que l'effort de déplacement dû au dispositif d'étanchéité lui-même est nul ; de plus, la course peut être très importante et la pression élevée. Ce type d'étanchéité est relativement peu utilisé, sauf pour l'entraînement d'index indicateurs ou dans certains convoyeurs (industrie nucléaire).

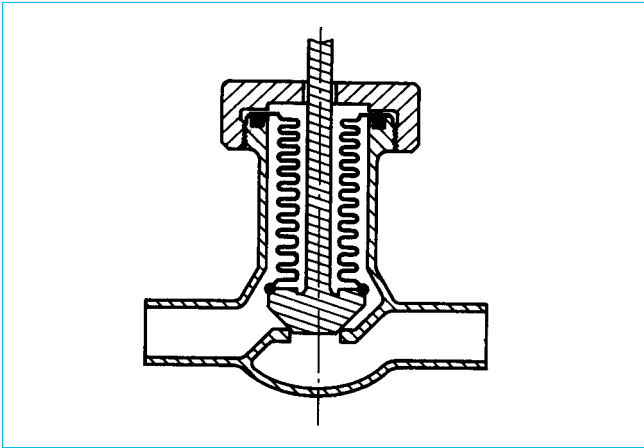


Figure 40 – Étanchéité de robinet par soufflet ondulé

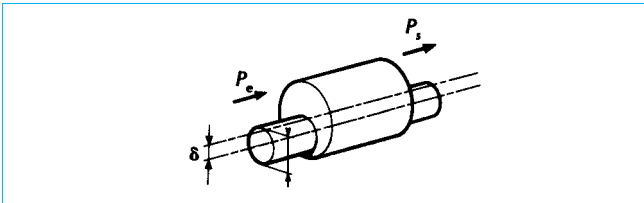


Figure 41 – Écoulement à travers une section annulaire

6.2 Étanchéité par fuite contrôlée

6.2.1 Jeu annulaire lisse

Pour qu'un organe qui traverse une paroi soit mobile, il est nécessaire qu'existe entre eux un jeu. Ce jeu va entraîner une fuite qui sera d'autant plus importante qu'il aura une valeur plus grande. Néanmoins, avec certains liquides, surtout si la viscosité est assez élevée, la fuite sera faible et tout à fait acceptable si le liquide reste à l'intérieur du système, comme dans un tiroir de distributeur hydraulique par exemple. Aussi, ce type d'étanchéité, très simple, est courant en hydraulique de transmissions.

L'écoulement à travers une fuite annulaire d'un liquide en régime laminaire donne un débit volumique de fuite égal à :

$$Q_v = \frac{\pi D (P_e - P_s) j^3}{12 \eta L} \left(1 + \frac{3}{2} \varepsilon^2\right)$$

avec ε excentricité relative de l'arbre dans l'alésage ($= 4 \delta / j$),

δ distance entre l'axe de l'arbre et celui de l'alésage (figure 41).

La figure 42 donne un abaque complet, valable aussi bien pour les gaz que les liquides, en régimes laminaire et turbulent.

6.2.2 Dispositif à gorges et rainures

Pour diminuer les fuites, il est possible de réaliser sur l'arbre, ou dans l'alésage, ou bien encore sur les deux à la fois, de petites gorges qui vont perturber l'écoulement en entraînant une perte de charge supplémentaire donc une diminution du débit de fuite (figures 43 et 44). Cette solution est très utilisée en hydraulique.

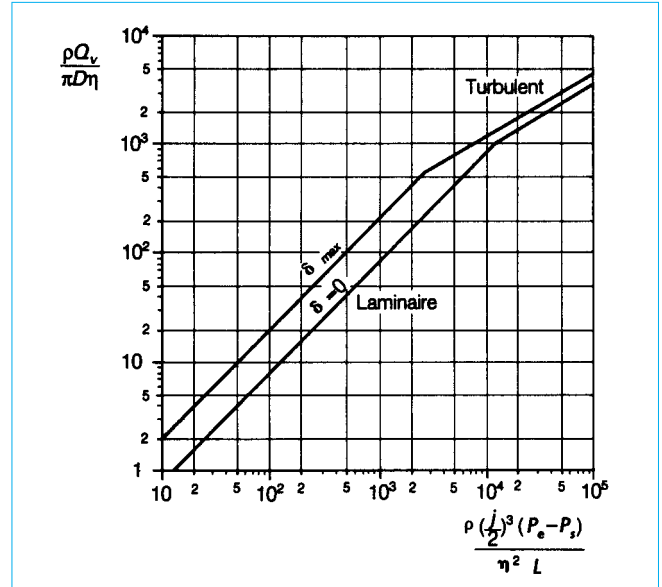


Figure 42 – Courbe de débit volumétrique dans un espace annulaire

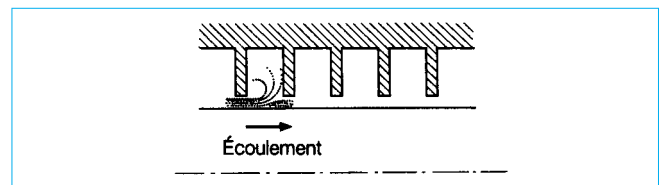


Figure 43 – Phénomène de perturbation dans un écoulement à section à gorges

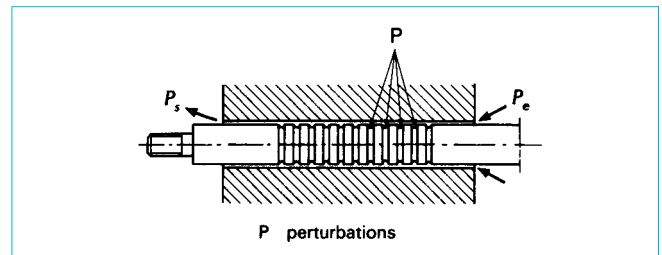


Figure 44 – Étanchéité à fuite contrôlée à gorges

La perte de charge donnée par une série de gorges réalisées dans l'alésage, ou sur l'arbre, a sensiblement pour valeur [15] (figures 45 et 46) :

$$P_e - P_s = \rho \frac{v_e^2}{2} [1,5 + z(a + 0,5b + \xi_f)]$$

avec ρ masse volumique,

v_e vitesse d'écoulement du fluide,

a et b donnés par la figure 46a en fonction du rapport de S_j et S_g , respectivement section du jeu inter-gorges et section de la gorge,

$$\xi_f = \lambda \ell / D_H,$$

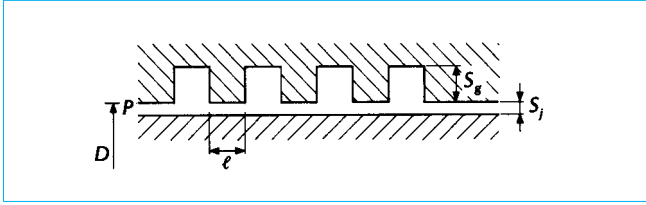


Figure 45 - Perte de charge à travers des gorges

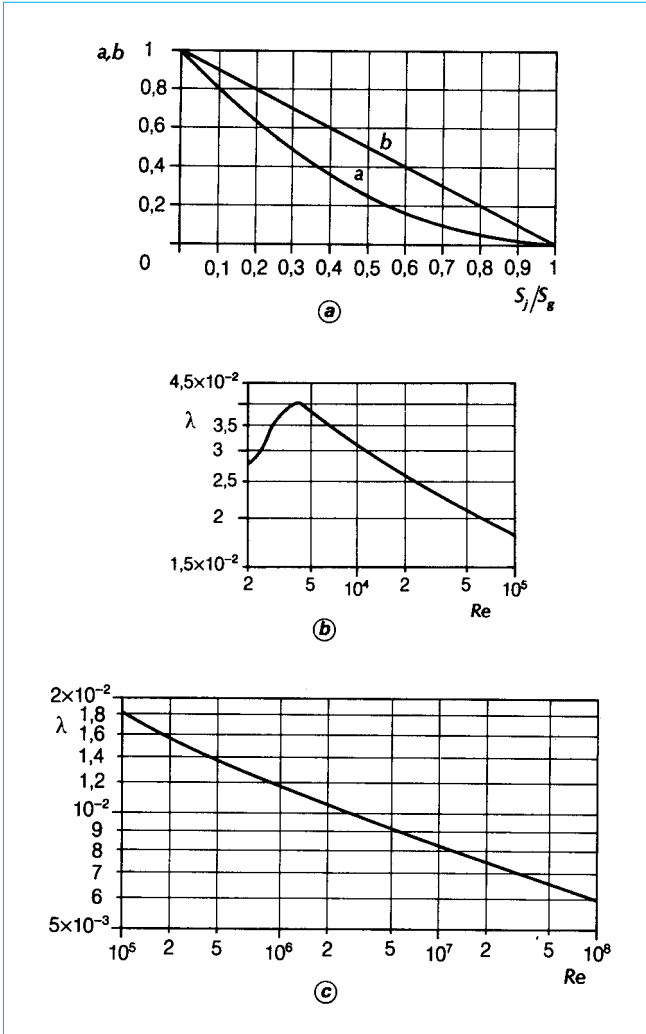


Figure 46 - Abaques pour la détermination des coefficients *a*, *b* et λ servant au calcul des pertes de charge

- λ donné par les courbes de la figure 46b et c en fonction du nombre de Reynolds de l'écoulement,
- l longueur de chacun des jeux inter-gorges,
- D_H diamètre hydraulique $\left(= \frac{4 S_i}{\pi D} \right)$,
- z nombre de gorges.

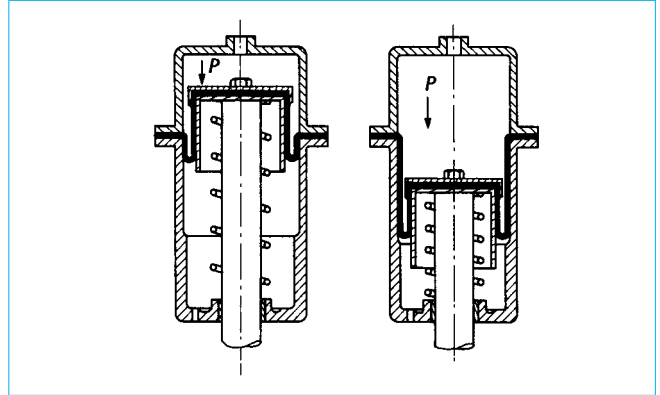


Figure 47 - Membrane à déroulement

6.3 Étanchéité relative

6.3.1 Par déformation

Comme en étanchéité absolue, des membranes déformables sont utilisées mais elles sont réalisées à partir d'élastomères. Comme ces matériaux ne sont pas totalement imperméables, une très petite fuite existe, surtout avec les gaz.

La membrane peut être sensiblement plane, serrée sur chacun de ses bords. La course reste limitée à quelques millimètres. Pour supporter des pressions assez élevées (5 MPa voire plus), suivant le diamètre, elle est souvent toilée. Ce type est utilisé par exemple dans les manodétendeurs ou les régulateurs.

La membrane à déroulement (figure 47), d'épaisseur plus faible (quelques dixièmes de millimètre), permet des courses beaucoup plus grandes, pouvant atteindre quelques dizaines de centimètres. La pression, toutefois, est limitée et ne dépasse guère 1 MPa pour les membranes les plus petites. Un autre avantage est un déplacement avec un effort faible et constant quelle que soit la course. Il est important que la membrane soit bien guidée et appuyée sur des parties cylindriques lisses, surtout si la pression n'est pas négligeable.

Ces membranes trouvent une application principale dans des appareils de mesure ou dans des vérins à faible effort de déplacement.

6.3.2 Par joints

L'étanchéité en mouvement de translation est le plus souvent résolue avec un joint qui, solidaire d'une des deux surfaces, va venir en contact avec l'autre surface et donc frotter sur elle. L'étanchéité devant être assurée aussi à l'arrêt, ce joint, outre des caractéristiques de joint statique, doit présenter les meilleures caractéristiques en frottement possible, c'est-à-dire :

- résistance au déplacement minimale,
- usure négligeable.

Le frottement entraîne un dégagement de chaleur souvent préjudiciable à la durée de vie. Toutefois, il faut remarquer qu'en translation la surface en contact glissant avec le joint se renouvelle, ce qui facilite l'écoulement thermique.

La résistance au déplacement et à l'usure est fonction de très nombreux paramètres dont les principaux sont :

- la nature du matériau du joint,
- la nature du matériau de la surface frottante,
- la vitesse de déplacement,
- la pression,

- le fluide à étancher,
- la qualité de la surface mobile (dureté, rugosité, etc.).

Les règles de base de la réduction du frottement et de l'usure doivent être appliquées avec soin, à savoir :

a) empêcher le contact direct des deux surfaces en mouvement par l'interposition de lubrifiant, d'où la nécessité de lubrifier le joint si le liquide lui-même n'est pas un lubrifiant, un joint sec n'ayant pratiquement aucune durée de vie ;

b) faire frotter entre eux des matériaux différents par leur nature et leur dureté ;

c) rendre la surface qui parcourt le plus grand chemin la plus dure possible avec la rugosité la plus faible ; cette surface correspond à celle dont tous les points ne sont pas soumis simultanément au frottement ; en étanchéité avec joint, cette surface est le plus souvent celle de l'arbre qui doit donc avoir une grande dureté et une faible rugosité ;

d) faire les rayures d'usinage perpendiculaires au déplacement, ce qui est, de plus, favorable du point de vue de l'étanchéité ;

e) rendre le facteur thermique défini comme le produit (capacité thermique \times masse volumique \times coefficient de conductivité thermique) le plus grand possible ; il est aussi nécessaire que le corps de la surface qui parcourt le plus grand chemin, ici c'est l'arbre, ait un facteur thermique minimal, ce qui n'est pas toujours facile à respecter.

6.3.2.1 Matériaux pour joints en translation

D'assez nombreux matériaux utilisés pour les joints statiques le sont aussi pour les joints dynamiques.

6.3.2.1.1 Élastomères

Les élastomères sont beaucoup utilisés dans ce type de joints malgré un coefficient de frottement assez élevé et une mauvaise conductivité thermique. Il est absolument indispensable, avec les élastomères, de lubrifier le joint. Les familles principalement employées sont :

- les nitriles, surtout avec les huiles minérales ;
- les silicones pour des températures jusqu'à 200 °C, mais ils sont peu résistants à l'usure ;
- les produits fluorés également pour des températures jusqu'à 200 °C ; ils sont utilisables avec de nombreux produits chimiques et ont de bonnes qualités mécaniques ;
- il faut y ajouter le polyuréthane, très résistant à l'usure, mais sensible à un certain nombre de fluides liquides, en particulier l'eau.

Il est important de remarquer que la matière du joint en contact avec la surface frottante s'échauffe ; par suite, sa température risque d'être supérieure à la température du fluide. Si cette dernière est voisine de la température limite d'utilisation de l'élastomère, il y a risque de détérioration. Cela est vrai aussi pour les autres matériaux, d'autant plus que leur coefficient de conductivité thermique est faible.

6.3.2.1.2 Matières plastiques

Les polyamides sont utilisés assez souvent car ils ont un coefficient de frottement relativement faible. Ces matériaux étant aussi très mauvais conducteurs de la chaleur, ils sont souvent chargés par des poudres de graphite ou de bisulfure de molybdène (qui abaissent encore le coefficient de frottement) et par de fines particules métalliques (cuivre, plomb, etc.), mais le plus intéressant est le PTFE dont le coefficient de frottement est très bas (0,1 à 0,05).

Le PTFE permet aussi de travailler dans des fluides jusqu'à 250 °C et, chargé de graphite ou de bisulfure de molybdène, il peut fonctionner avec une lubrification très faible, voire absente, sous des conditions de pression et de vitesse toutefois modérées.

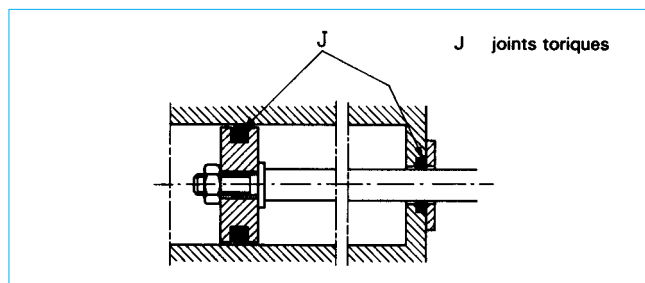


Figure 48 – Joint torique en translation

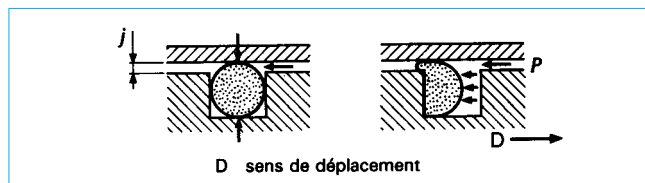


Figure 49 – Risque d'extrusion en déplacement

6.3.2.1.3 Métaux

Sauf pour les segments, ils sont peu utilisés, par suite de leur tendance au grippage. Là aussi, la lubrification est très importante et absolument indispensable.

La fonte et le bronze sont les deux matériaux courants.

6.3.2.1.4 Autres matériaux

Le graphite est un matériau assez utilisé pour son faible coefficient de frottement, pour son bon transfert thermique et pour sa grande inertie chimique même à température élevée (400 °C dans l'air).

On utilise parfois l'amiante en association avec le PTFE.

6.3.2.2 Formes des joints en translation

6.3.2.2.1 Joints toriques

● **À section circulaire** : le joint torique à section circulaire en élastomère est assez utilisé en étanchéité de translation. Il peut être monté soit dans l'alésage, soit sur le piston (figure 48). Cependant, du fait de sa forme, il a tendance à rouler lors du mouvement et s'il est soumis à une pression assez importante, une détérioration risque de se produire (figure 49).

Le jeu maximal possible entre piston et alésage dépend de la pression du fluide et de la dureté de l'élastomère. Il est donné par la figure 50.

La vitesse de déplacement doit être faible (en général jusqu'à $0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), parfois il est possible d'atteindre $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Le frottement est relativement important. Un ordre de grandeur peut être calculé à partir de l'expression suivante :

$$F_f = \alpha \pi D + \beta (S_g + S_j)$$

avec F_f (N) représentant la force de déplacement,
 α, β coefficients donnés par la figure 51, cela s'entend avec un joint lubrifié et sur une surface d'acier dur.

Au démarrage, l'effort peut être de 2 à 5 fois plus important, surtout si le joint est resté longtemps immobile.

Il est déconseillé de faire frotter des joints en élastomère sur un alliage de cuivre et sur un alliage d'aluminium. Avec ces derniers, une anodisation dure est conseillée.

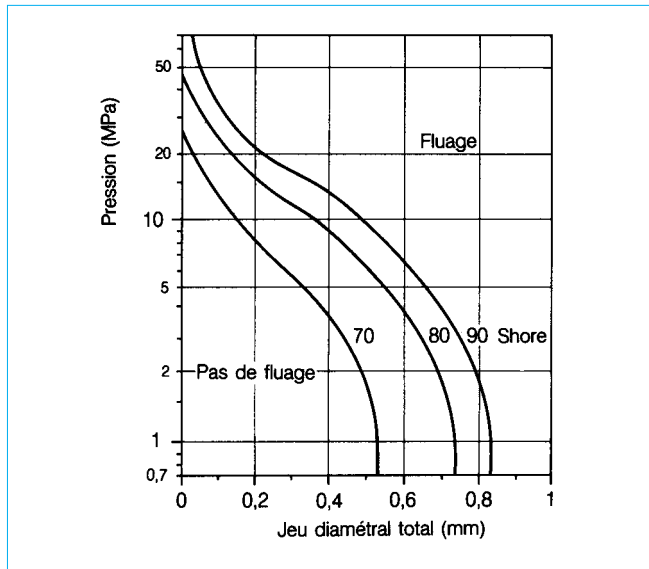


Figure 50 – Jeu maximal de l'alésage du piston pour éviter l'extrusion du joint



Figure 52 – Montage d'un joint torique flottant

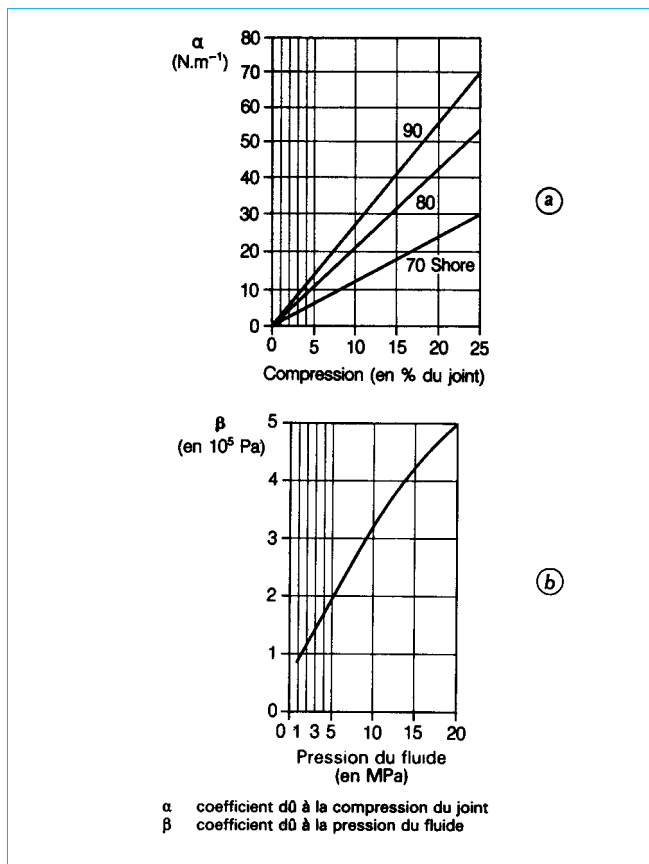


Figure 51 – Abaqués pour le calcul du frottement d'un joint torique en élastomère butadiène-acrylonitrile de diamètre compris entre 4 et 6 mm

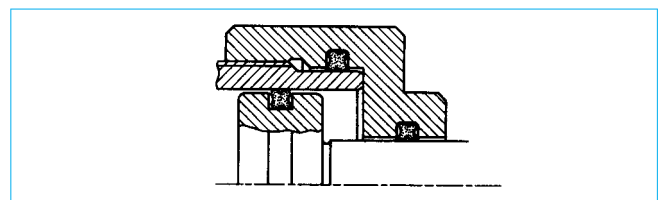


Figure 53 – Joint quadrilobe

Avec des gaz il est intéressant, pour réduire le frottement, d'utiliser le montage dit à joint flottant (figure 52) ; la pression doit être inférieure à 1 MPa. Toutefois, à la mise sous pression, un faible volume s'échappe mais la vitesse peut atteindre $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Le diamètre extérieur du joint doit être de 2 à 8 % plus grand que l'alésage du cylindre. Le diamètre intérieur du joint ne doit pas porter sur le fond de gorge. Le montage est donné par la figure 52.

- À section elliptique pour réduire la tendance au roulement : ce joint est très peu développé et ne présente qu'un faible intérêt.

- À section quadrilobe (figure 53), toujours pour réduire la tendance au roulement et réduire l'effort de frottement : l'expérience prouve toutefois que ce joint est délicat d'emploi et conduit souvent à une usure plus importante qu'avec le joint à section circulaire.

Les joints toriques en élastomère ne peuvent pas être utilisés seuls en translation pour des pressions supérieures à 10 MPa. Pour éviter le phénomène d'extrusion, on ajoute des bagues de part et d'autre du joint ; ce sont des rondelles en matières plastiques coulissant juste sur la surface en mouvement (figure 54). Ces rondelles peuvent être continues (montage en gorge ouverte) ou fendues pour permettre leur montage en gorge fermée. Il est alors possible de faire fonctionner le joint jusqu'à des pressions de 60 MPa, voire de 100 MPa.

6.3.2.2.2 Joints composites

Il existe une assez grande variété de joints composites. Le plus courant est composé d'une bague en matériau plastique, polyamide

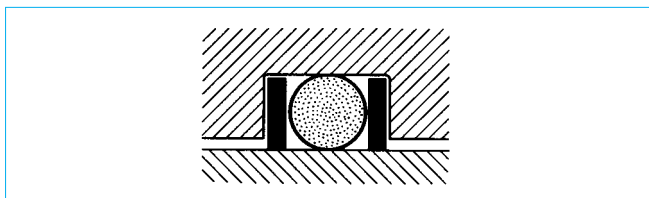


Figure 54 – Joint torique et bague anti-extrusion

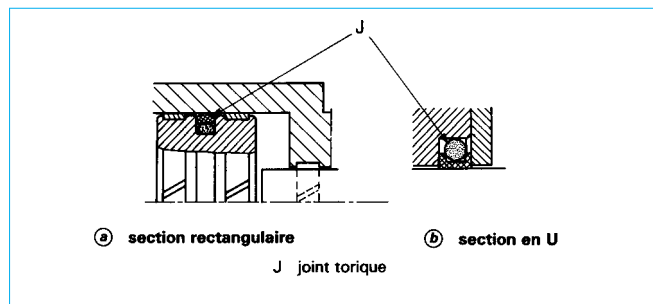


Figure 55 – Joint composite : bague + joint torique

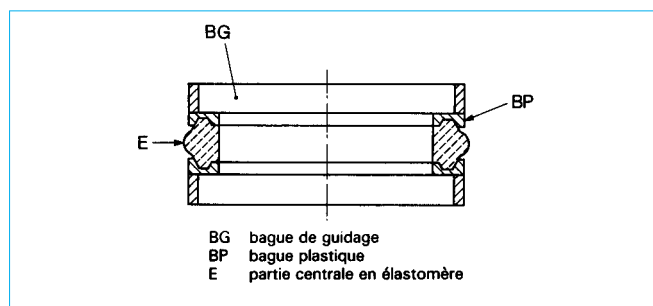


Figure 56 – Joint composite à profil spécial

ou PTFE souvent chargé, à section rectangulaire ou en U mince, qui frotte sur la partie mobile ; la bague est appuyée sur cette surface frottante par un joint torique en élastomère (figure 55).

La force de déplacement est relativement faible, nettement inférieure à celle du joint torique (§ 6.3.2.2.1). La vitesse peut atteindre $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et la pression 20 à 40 MPa. Ce joint nécessite en outre un très bon état de surface ($R_a < 0,2 \mu\text{m}$) et un centrage très précis. Il est surtout utilisé sur des appareils de très bonne qualité.

Une autre forme, actuellement assez courante sur les vérins, est celle donnée en figure 56 ; la partie centrale assurant l'étanchéité est en élastomère et elle est entourée de bagues plastiques de forme concave vers cette partie centrale.

6.3.2.2.3 Joints en U, L, V

Les premiers joints ont une section en U, le matériau étant de l'élastomère qui peut être complété à l'intérieur par un toilage de renfort pour les pressions supérieures à 10 MPa (figure 57).

L'étanchéité est réalisée par les deux lèvres du U, du côté statique comme du côté dynamique. Ce type de joint est autoétanche, mais la pression ne peut être appliquée que d'un côté, aussi, lorsque cette dernière s'inverse, il est nécessaire de prévoir deux joints tête-bêche (figure 58).

Il est aussi très important de prévoir une pièce de maintien du joint qui appuie en son centre car le déplacement de la partie

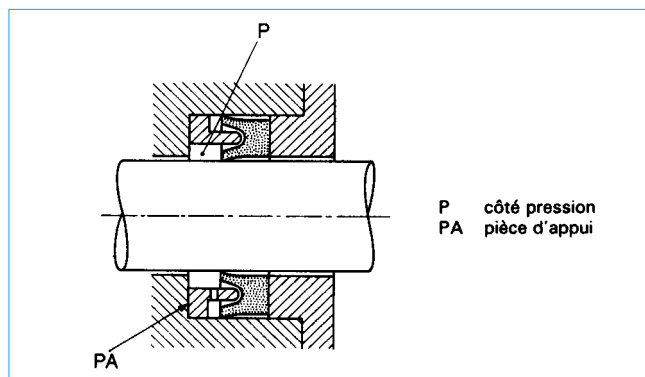


Figure 57 – Joint en U

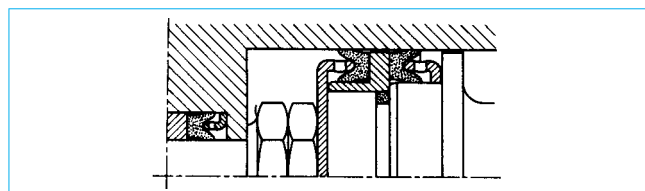


Figure 58 – Joint en U pour pression de part et d'autre du piston

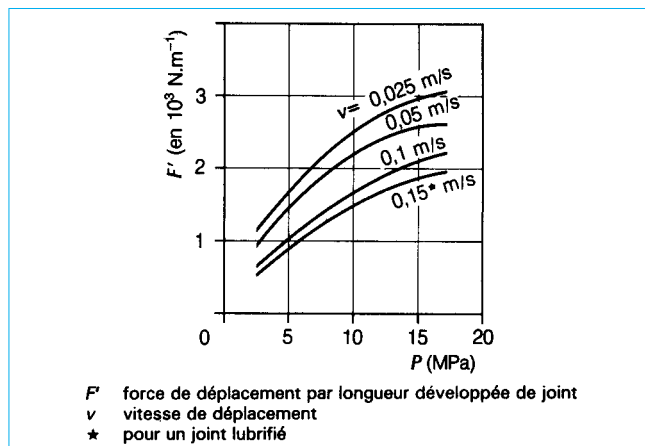


Figure 59 – Force de déplacement d'un joint en U

mobile tend à l'entraîner à l'intérieur de son logement et à détériorer la partie assurant l'étanchéité.

Le frottement de ces joints est relativement peu élevé ; la figure 59 donne un ordre de grandeur de l'effort de frottement. Avec les gaz, si la pression est faible (jusqu'à 0,7 MPa environ), il est possible d'utiliser un joint plus simple à une lèvre très souple (joint L, figure 60) ; le frottement est alors diminué d'environ 50 %. Les joints à profil en V ou joints chevron (figure 61), relativement voisins des précédents, peuvent être montés en série, ce qui autorise des pressions plus importantes (jusqu'à 40 et même 60 MPa).

Enfin, il faut mentionner un joint spécial, dont la fonction n'est pas l'étanchéité mais y est rattachée : c'est le joint racleur. Dans de nombreuses utilisations, l'atmosphère extérieure est chargée de poussières ou de particules abrasives. Il est nécessaire de protéger le joint d'étanchéité de ces grains abrasifs qui risquent d'être introduits par les mouvements de la tige. Un tel joint est donc placé

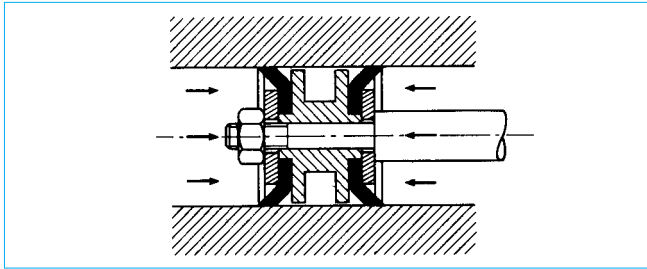


Figure 60 – Joint en L pour gaz à faible pression

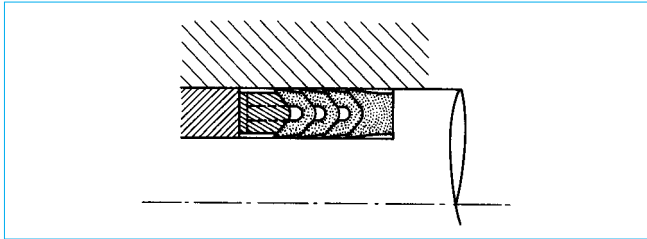


Figure 61 – Joint en V ou chevron

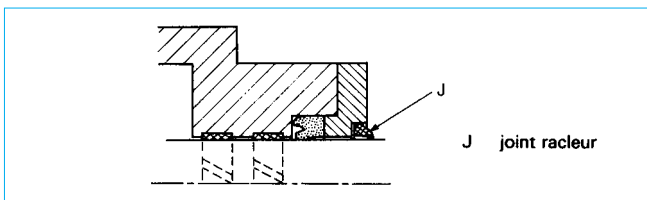


Figure 62 – Joint racler



Figure 63 – Tresse unitaire

avant le joint principal (figure 62), il a la forme d'un racloir et il est réalisé en élastomère dur (98 Shore A) ou en matière plastique.

6.3.2.2.4 Tresses

Elles se présentent sous la forme d'un anneau de section carrée réalisé à partir d'un cordon en fils tressés coupé en biseau (figure 63). Les fils sont le plus souvent un mélange d'amiante et de PTFE. Il en existe aussi en chanvre enduit de produits gras, voire avec interposition de fils métalliques.

Ces anneaux sont placés dans des logements annulaires et serrés par un fouloir (figure 64). Leur nombre est fonction de la pression à étancher. La répartition de la pression des anneaux sur la tige coulissante n'est pas uniforme, si bien qu'à partir d'un certain nombre d'anneaux (5 à 6) leur efficacité est quasiment nulle [13].

On constate aussi, surtout au début de leur mise en service, un certain tassement qui introduit une fuite, qui nécessite un resserrage, aussi le poussoir est-il souvent monté à l'aide de ressorts qui assurent un effet de serrage relativement constant (figure 65).

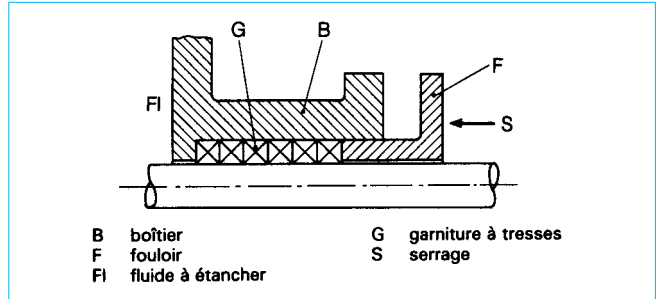


Figure 64 – Presse-garniture

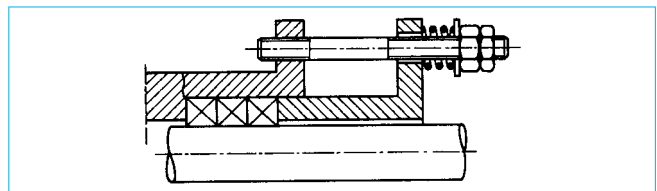


Figure 65 – Serrage automatique de presse-garniture

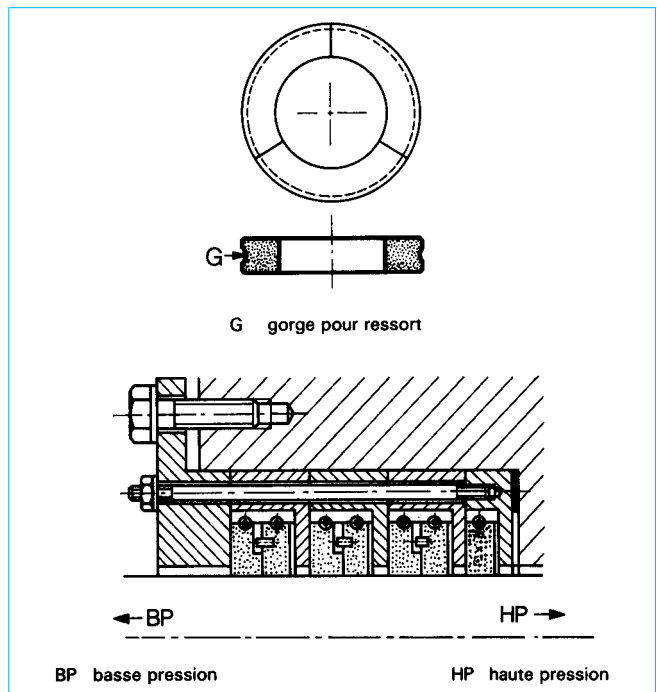


Figure 66 – Segments-anneaux de sortie de tige

Ces tresses autorisent des pressions élevées, jusqu'à 100 MPa ; les efforts de frottement sont assez importants. Elles sont beaucoup utilisées dans les pompes alternatives à haute pression.

6.3.2.2.5 Segments

Ils peuvent se présenter sous deux formes :

- des anneaux unitaires en plusieurs morceaux (en général 3) assemblés par un ressort (figure 66) et empiétés ; ils sont réalisés

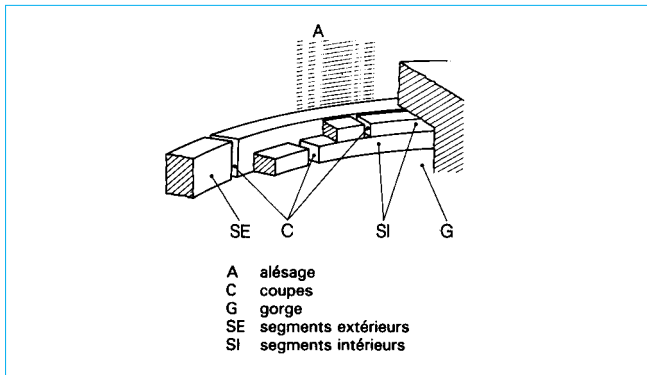


Figure 67 – Segment triple étanche

en matériaux frittés, bronze chargé de graphite ou de bisulfure de molybdène, graphite pur, etc. ; ils sont utilisés essentiellement pour les sorties de tiges avec des vitesses importantes (quelques mètres par seconde) et des pressions jusqu'à 0,25 MPa ;

– des *anneaux d'un seul morceau mais fendus*, d'un diamètre libre un peu plus grand que le diamètre à étancher et placés dans une gorge ; ils viennent frotter sur la surface en mouvement sur laquelle ils s'appliquent par élasticité ; leur section est carrée ou rectangulaire et les matériaux utilisés sont des fontes spéciales (moteur thermique, compresseur), du carbone ou du PTFE chargé (compresseur, pompe, régulateur,...) ; de par leur conception (absence de plasticité pratique, fente), ils ne présentent pas une grande étanchéité ; le plus souvent, on en monte plusieurs en série, ce qui permet de réduire les fuites.

À signaler aussi l'utilisation d'un segment triple (figure 67), qui permet de n'avoir que des fuites très faibles, les anneaux bloquant réciproquement leur fuite aux fentes.

6.3.2.2.6 Conclusion

En résumé, le tableau 6 donne les caractéristiques des joints d'étanchéité en translation les plus intéressants.

6.3.3 Précautions à prendre

Pour qu'une étanchéité en mouvement de translation avec des joints soit fiable et possède une durée de vie suffisante, il est impératif de tenir compte des règles suivantes :

Tableau 6 – Joints d'étanchéité en translation les plus intéressants

Type de joint	Schéma	Matériau	Pression maximale MPa	Vitesse maximale $m \cdot s^{-1}$	Frottement	Température maximale °C	Applications principales
Torique à section circulaire (§ 6.3.2.2.1)		Élastomère	10	0,2	Assez élevé, phénomène de roulement	200	Mouvement d'assez faible amplitude. Pour faible encombrement, bas prix, deux sens de pression
Torique à section circulaire + bague (anti-extrusion) (§ 6.3.2.2.1)		Élastomère. Matière plastique	40	1	Moyen	200	Vérin avec faible encombrement. Deux sens de pression
Composite (§ 6.3.2.2.2)		Élastomère. Matière plastique	40	2	Assez faible	200	Mouvement à faible effort de déplacement. Coût important. Deux sens de pression
Section en U (§ 6.3.2.2.3)		Élastomère seul ou avec armature textile	10	1	Moyen	100	Vérin courant de moyenne pression, huile ou autre liquide gras
Section en L (§ 6.3.2.2.3)		Élastomère	2	2	Faible	100	Air ou gaz comprimé à assez faible pression
Section en V chevron (§ 6.3.2.2.3)		Élastomère seul ou avec armature textile	60	1	Assez élevé	100	Vérin à forte pression à liquide
Anneaux Tresses (§ 6.3.2.2.4)		Amiante. PTFE. Graphite	100	5 20	Assez élevé à assez faible	400 650	Sortie d'arbre de pompe alternative ou de compresseur
Segments (§ 6.3.2.2.5)		Fonte ou PTFE chargé	0,5 (par segment)	5	Moyen à faible	400	Piston de moteur ou de compresseur
Anneaux-segments (§ 6.3.2.2.5)		Carbone ou bronze graphité	0,25 (par segment)	5	Moyen à faible	600	Sortie de tige de compresseur

- les aciers étant les matériaux les plus appropriés, la dureté de la surface frottante doit être importante, supérieure à HV 450 ;
- la rugosité doit être faible, rugosité moyenne R_a de l'ordre de $0,4 \mu\text{m}$;
- le guidage, c'est-à-dire en fait le centrage, doit être bon, un joint ne constituant jamais lui-même un centrage ;
- la lubrification doit toujours être assurée (sauf cas très particulier, faibles vitesses et pression) ;
- la température maximale du fluide doit être inférieure (de 10 à 20 °C) à la température limite d'utilisation du matériau du joint.

6.3.4 Difficultés rencontrées

Les fuites et les usures prématurées résultent en premier lieu du non-respect des règles précédentes (§ 6.3.3).

De plus, des phénomènes propres à ce type de joints peuvent se produire, notamment avec les liquides. Il s'agit de l'effet de surpression dû à la vitesse de déplacement du joint (cf. article *Vérins hydrauliques* dans ce traité).

Il y a aussi l'effet *microdiesel* dû à un effet de cavitation, examiné dans l'article *Vérins hydrauliques*. Il est toujours important d'avoir un excellent remplissage dans les circuits hydrauliques, la présence de bulles de gaz étant très défavorable du point de vue de la tenue des joints.

7. Étanchéité aux liaisons dynamiques en rotation

7.1 Étanchéité rigoureuse

7.1.1 Par déformation

Des cinématiques permettent de transmettre un mouvement de rotation en continu en utilisant la déformation d'un organe souple, principalement un soufflet métallique, avec une étanchéité rigoureuse.

Les plus utilisées sont fondées sur la rotation d'un arbre oblique, le point milieu étant *rotulant* (figure 68a), ou d'un arbre coudé ou excentré (figure 68b).

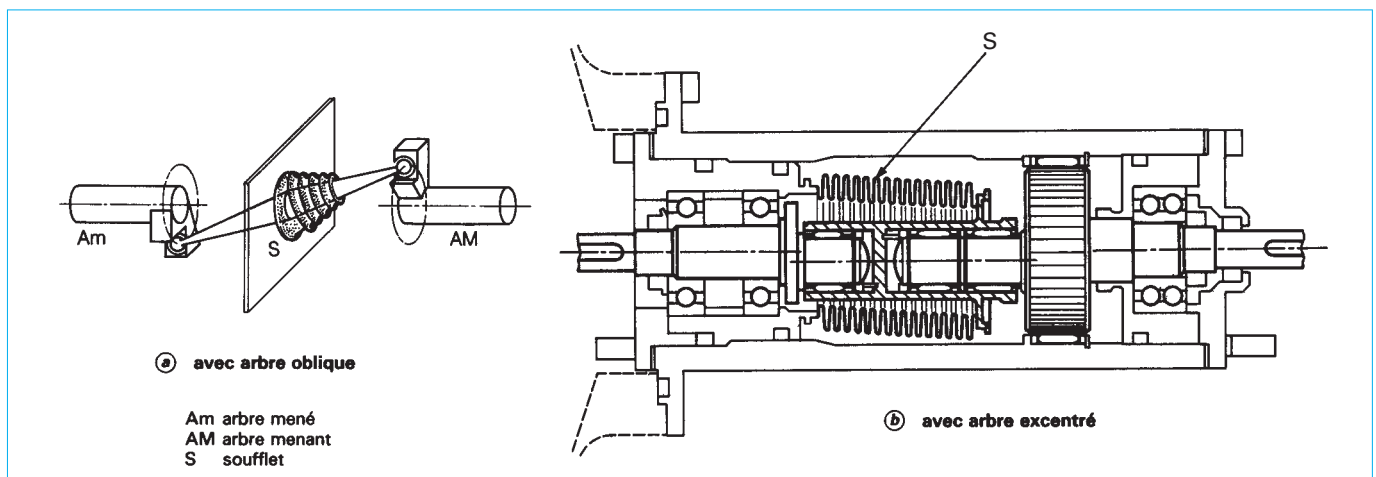


Figure 68 - Transmissions à soufflet

Ces dispositifs sont néanmoins assez compliqués et coûteux. Ils permettent des vitesses de rotation de plusieurs centaines de tours par minute et des pressions de 0 à 1 MPa environ.

Peu utilisés, ils existent dans certains appareils qui mettent en œuvre des fluides très dangereux, radioactifs, ou pour l'ultra-vide.

7.1.2 Par transmission magnétique

Une partie magnétique solidaire de l'arbre menant entraîne une autre partie magnétique solidaire de l'arbre mené, une cloison métallique à magnétique et relativement mince étant placée dans l'entrefer du champ (figure 69).

Le champ magnétique est le plus souvent produit par des aimants permanents. La cloison est cylindrique, ce qui lui permet, même avec une assez faible épaisseur, de résister à de fortes pressions (10 MPa et plus).

La vitesse peut être très élevée, mais il n'y a pas synchronisme rigoureux entre les deux arbres (il peut même se produire un décrochage).

Ce type de transmission se répand beaucoup, surtout dans les pompes pour l'industrie chimique, par suite des progrès sur les aimants qui permettent de transmettre des couples déjà importants (10 à 100 N · m), sous des volumes assez réduits.

Un cas particulier est celui des moteurs dits à *rotor noyé* (figure 70) dans lequel le champ magnétique transmis à travers la paroi (chemise d'entrefer) est le champ tournant produit par le stator. Il est assez utilisé, par exemple, dans les accélérateurs de chauffage central.

7.2 Étanchéité par fuite contrôlée

7.2.1 Joints labyrinthes

Les étanchéités par fuite contrôlée sont du même type que celles utilisées en translation. Toutefois, puisque l'arbre ne subit pas de déplacement axial, il est possible de faire parcourir au fluide un chemin de fuite beaucoup plus grand, ce qui réduit le débit (figure 71) : ce sont les labyrinthes. Plusieurs variantes sont possibles (figure 72). Le calcul des fuites est identique à celui donné au paragraphe 6.2.2, en utilisant les paramètres de la figure 72.

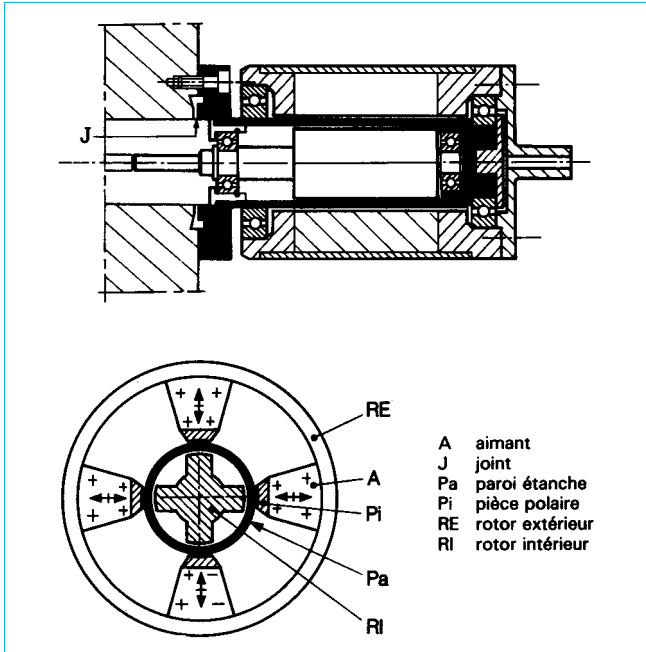


Figure 69 – Traversée magnétique étanche

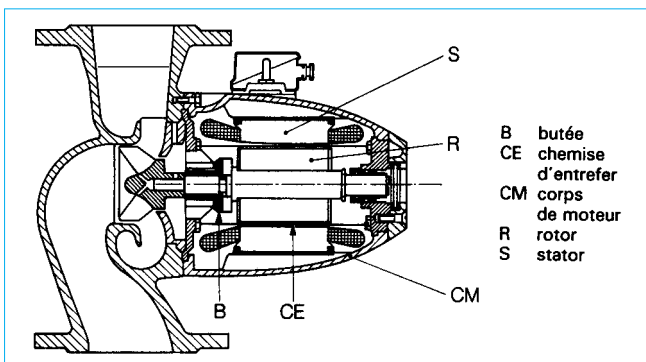


Figure 70 – Moteur d'entraînement de pompe à chemise d'entrefer

Les joints labyrinthes sont assez répandus, depuis des étanchéités aux poussières ou à l'huile sans pression (figure 73), fabriqués en série et peu coûteux, jusqu'aux dispositifs pour turbine plus ou moins complexes.

Pour réduire les fuites, il est nécessaire de diminuer le plus possible le jeu entre la partie fixe et la partie tournante.

Pour éviter des détériorations importantes en cas de contact intempestif, une partie peut être réalisée sous forme de segments mobiles (figure 74).

Avec la vapeur, le phénomène de détente assure une condensation en fin de parcours du joint, l'eau étant récupérée et renvoyée à la chaudière.

7.2.2 Joints de transferts

Pour les liquides, surtout pour l'huile, existe un autre dispositif à fuite contrôlée, dit *joint de transfert* du type hydrostatique (figure 75).

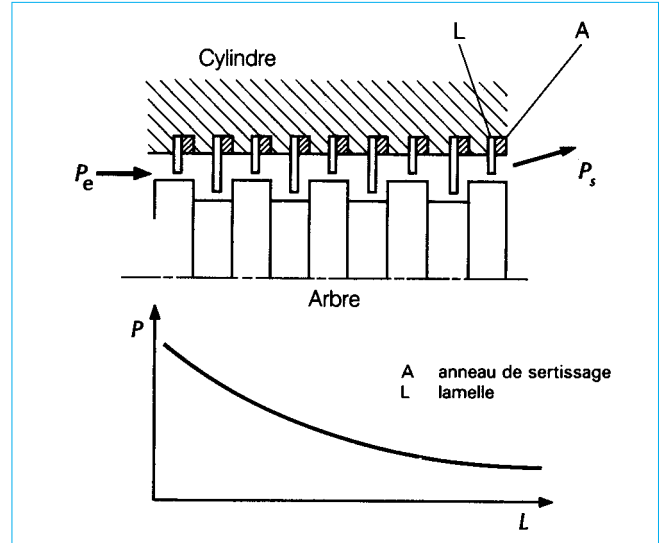


Figure 71 – Joint labyrinthe

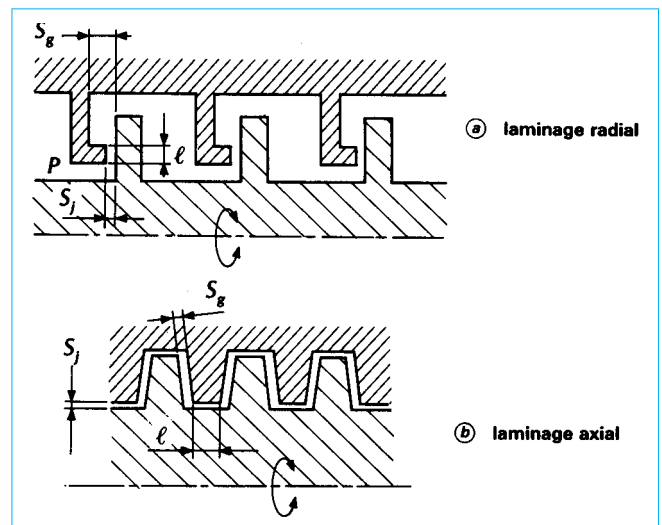


Figure 72 – Différentes formes de joints labyrinthes à laminage radial et axial

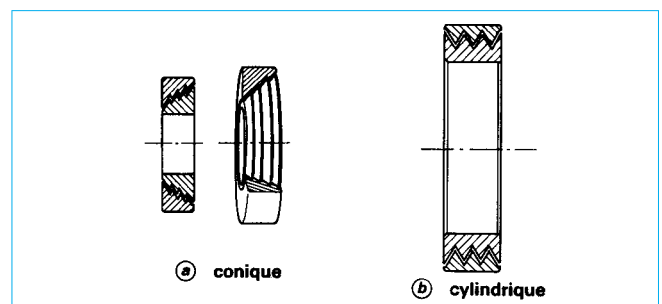


Figure 73 – Joints labyrinthes du commerce (d'après doc. FAG)

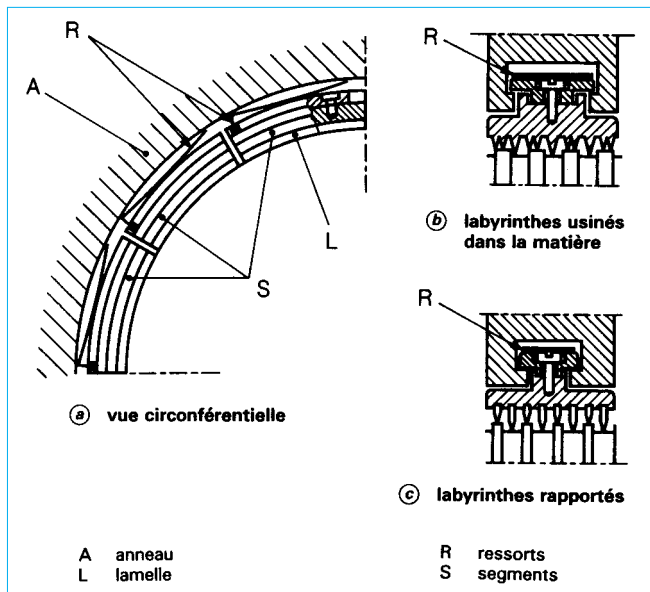


Figure 74 – Joints labyrinthes à segments éclipçables

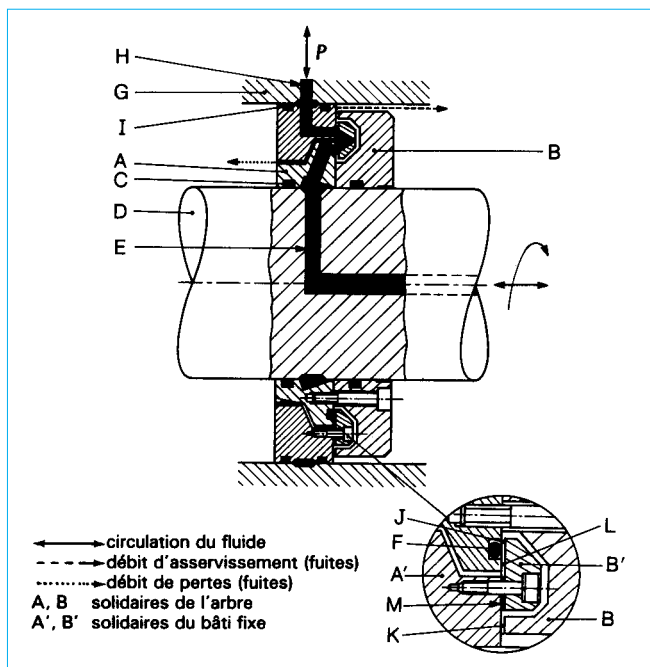


Figure 75 – Joint de transfert (d'après doc. Viscotherm)

Le joint de transfert comprend 4 pièces vissées deux à deux (A + B et A' + B'). Les pièces A/B sont reliées au moyen de joints élastiques secondaires C à l'arbre tournant ; les pièces A'/B' sont également reliées à travers des joints secondaires I avec le bâti G. Le fluide sous pression vient par un conduit H au bâti G et passe à travers les pièces A' et B' dans la rainure de distribution F qui débouche dans le plan des fentes d'étanchéité J-L. Cette rainure F est en contact au moyen de trous dans la pièce A avec les conduits E de l'arbre D. Les fentes J, K et L se trouvent dans un plan. Le jeu

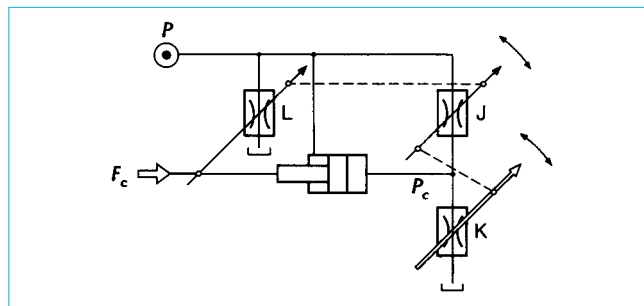


Figure 76 – Schéma hydraulique du joint de transfert

nécessaire au fonctionnement du joint est donné par l'entretoise M. Les fentes J et K, la surface de haute pression définie par la rainure de distribution F et la zone de pression intermédiaire délimitée par les fentes J et K forment le mécanisme d'asservissement hydrostatique.

L'asservissement est un demi-pont laminaire auto-ajustant à deux branches actives, les étranglements dus aux fentes J et K étant représentés par les orifices variables J et K dans le circuit équivalent de la figure 76. La fente L suit le mouvement de la fente J mais ne participe pas à l'asservissement. Le mode de fonctionnement de l'asservissement hydrostatique peut être expliqué comme suit.

a) **État d'équilibre** (figure 77a) : les fentes J et K forment un diviseur de pression tel que la pression intermédiaire P_c génère une force F_c antagoniste et égale à la force F due à la haute pression P dans la rainure de distribution. La résultante des forces sur la paire de pièces A/B est nulle : A/B est donc en équilibre.

b) **Perturbation amenant A/B vers la droite** (figure 77b) : la fente J se ferme, la fente K s'ouvre, la pression intermédiaire P_c et la force F_c chutent en conséquence. La force F restant invariable, la résultante $F - F_c$ agissant sur A/B tend à pousser la pièce vers la gauche, donc vers l'état d'équilibre selon la figure 77a.

c) **Perturbation amenant A/B vers la gauche** (figure 77c) : la fente J s'ouvre, la fente K se ferme. La pression intermédiaire P_c , donc la force F_c augmente et provoque une résultante $F_c - F$ qui pousse la pièce A/B vers la droite, vers l'état d'équilibre selon la figure 77a.

Les caractéristiques de ce joint sont les suivantes : les pertes de puissance dues aux fuites et au couple de frottement visqueux ne dépassent pas 3 % de la puissance transmissible (pour $P = 16$ MPa, le débit du fluide transféré étant de $3 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ au régime de $3000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$).

7.3 Étanchéité relative

Le mouvement de rotation permet de réaliser des étanchéités particulières qui ne sont efficaces que lorsqu'il y a déplacement. De tels systèmes dynamiques doivent être doublés d'un joint statique classique.

7.3.1 Par effet cinématique

7.3.1.1 Par effet visqueux

Un arbre sur lequel a été usiné un filetage et qui tourne dans le sens opposé à celui de ce filetage et dans un alésage ayant un faible jeu va exercer sur le fluide un effet de pression qui peut équilibrer la pression de ce fluide (figure 78). On réalise ainsi un joint à viscosité.

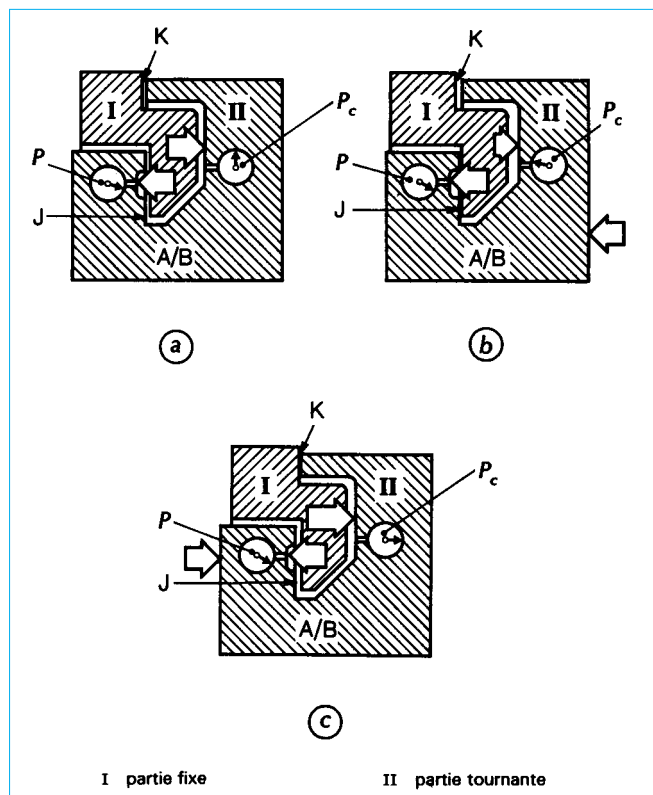


Figure 77 – Fonctionnement du joint de transfert

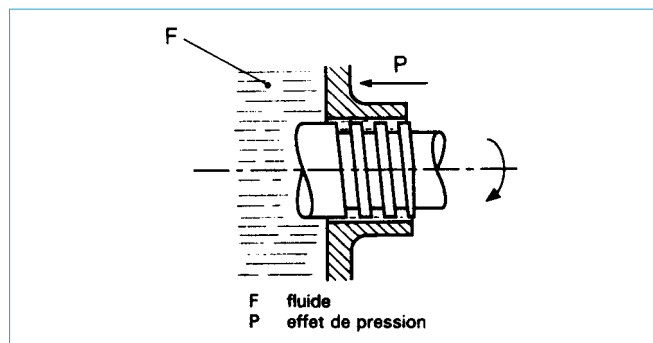


Figure 78 – Joint à viscosité

Les caractéristiques de ce système peuvent être calculées et optimisées. La pression engendrée est égale à :

$$P = \frac{12 K \eta D \omega L}{j^2}$$

avec K coefficient qui dépend du nombre de Reynolds ($K = 0,1$ pour $Re \leq 500$; K est donné par la figure 79 pour des nombres supérieurs).

La puissance W absorbée par effet de pompage est donnée par [11] :

$$W = \frac{\pi \eta \omega^2 D^3 L}{2 j} \cdot K_p$$

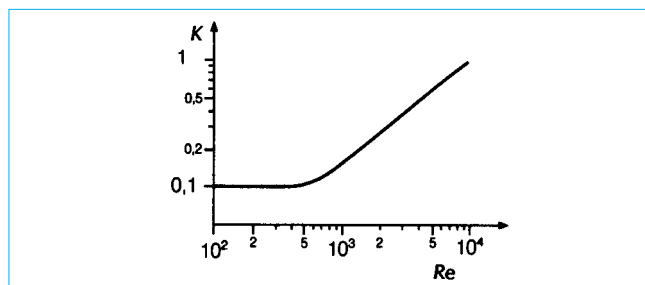


Figure 79 – Coefficient K en fonction du nombre de Reynolds

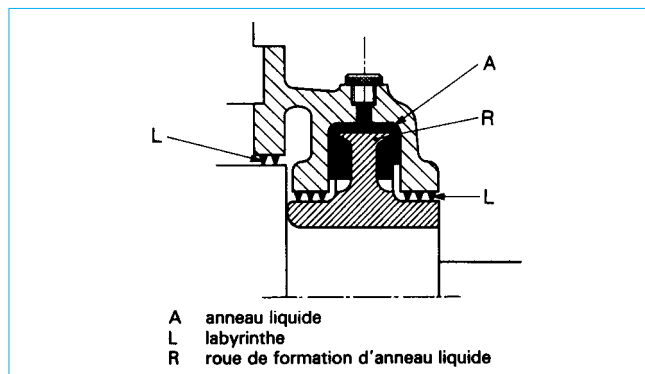


Figure 80 – Joint à anneau liquide simple centrifuge

Les pressions développées ne sont appréciables qu'avec les liquides dont, en plus, la viscosité n'est pas négligeable. Aussi, avec un arbre de 50 mm de diamètre dans un alésage de 100 mm de long, avec un jeu radial de 25 μm et avec une vitesse de rotation de 12 000 $\text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$, la pression développée sera de 5×10^{-2} MPa avec de l'air et de 3,2 MPa avec de l'eau, en sachant que $\eta = 1,8 \times 10^{-5}$ PI pour l'air et $\eta = 1,17 \times 10^{-3}$ PI pour l'eau. Il faut noter que le filetage optimisé a les caractéristiques suivantes :

- angle de l'hélice : 15° ;
- profil rectangulaire (le plein = le creux) ;
- pas = 1 mm, multifilets ;
- rapport de la profondeur du filet au jeu radial égal à 2,7.

Le filetage peut être aussi réalisé dans l'alésage, l'arbre étant lisse.

7.3.1.2 Par effet centrifuge

Un liquide entraîné en rotation va être soumis à l'accélération centrifuge et, à l'intérieur du liquide, se développera, à une distance R_c de l'axe de rotation, une pression maximale de :

$$P_{c_{\max}} = \frac{\rho \omega^2 R_c^2}{2}$$

Un tel joint centrifuge existe en particulier pour les gaz, l'anneau liquide étant de l'eau ou un liquide lourd, du mercure en particulier (figure 80).

Un nouveau joint a été développé récemment : il utilise l'anneau liquide qui est formé par un cylindre tournant, solidaire de l'arbre, et un tube de Pitot situé à une distance R_c de l'axe, qui prélève du liquide pour la réinjecter en contre-pression au fluide à étancher (figure 81). Dans ce cas, la pression est augmentée du terme pression dynamique et, si le débit est petit, la pression maximale sera pratiquement de :

$$P_{c_{p_{\max}}} = \rho \omega^2 R_c^2$$

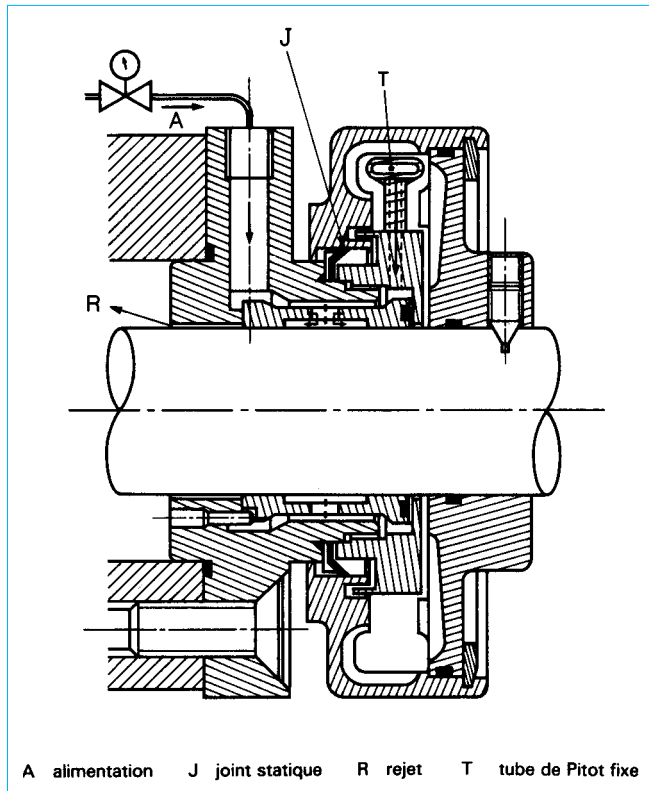


Figure 81 – Étanchéité à anneau liquide et tube de Pitot (système Legoy)

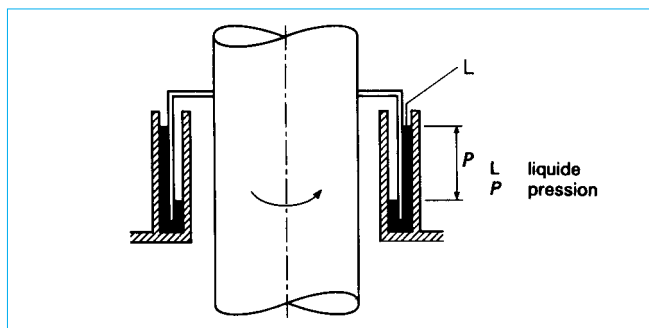


Figure 82 – Étanchéité par bain liquide

Ces types de joint nécessitent donc un joint complémentaire classique en statique et pour les faibles vitesses, mais en fonctionnement normal, ce dernier n'est plus soumis à une pression et sa durée de vie est considérablement augmentée.

7.3.1.3 Par bain liquide

L'étanchéité est excellente même à l'arrêt, exclusivement pour les gaz.

Ce système est très simple. Une gouttière contient un liquide dans lequel plonge une tôle cylindrique solidaire de l'arbre (figure 82). Si le liquide mouille très bien les parois, l'étanchéité peut être considérée comme rigoureuse si l'on fait abstraction de

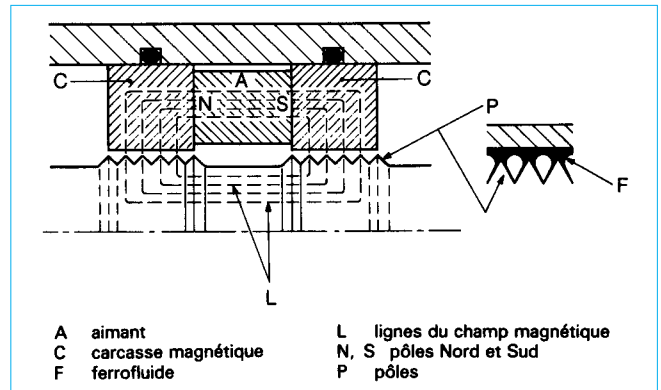


Figure 83 – Étanchéité par fluide magnétique

la pression de vapeur de ce liquide. Toutefois, le système ne fonctionne que pour un arbre d'axe vertical et avec une pression et une vitesse de rotation faibles. Même avec des liquides de forte masse volumique, le plus adapté étant le mercure, la pression possible ne dépasse guère 0,05 MPa.

À noter que ce liquide peut être solidifié (ou l'inverse, s'il s'agit d'un solide à température ambiante, on peut le rendre liquide en le chauffant, par exemple avec des alliages à bas point de fusion) lorsqu'il n'y a pas rotation.

Lorsque le joint est solidifié, la pression peut être beaucoup plus élevée (1 MPa et plus). Cela est appliqué sur certains réacteurs nucléaires.

7.3.1.4 Par liquide magnétique

Il s'agit d'un liquide qui contient, en suspension, une poudre très fine magnétique (ferrofluide). Si un champ magnétique le traverse, ce fluide acquiert une *rigidité* qui s'oppose à la pression dans le sens axial mais autorise la rotation avec un couple faible (figure 83).

Ce type d'étanchéité permet des vitesses importantes, allant jusqu'à des milliers de tours par minute, et des pressions dépassant 1 MPa. Il est appliqué actuellement surtout dans le vide et aux très basses températures (cryogénie).

7.3.2 Par joints

Ce qui différencie fondamentalement les joints pour mouvements tournants de ceux pour translation, c'est le fait que la surface mobile sur laquelle ils assurent l'étanchéité est pratiquement toujours la même. Cela a des conséquences très importantes du point de vue de l'usure, du dégagement et de l'évacuation de la chaleur. En outre, les vitesses atteintes peuvent être beaucoup plus élevées. De plus, l'étanchéité peut être réalisée, soit directement sur l'arbre (**joints radiaux**), soit en dehors de l'arbre en dynamique mais suivant une direction parallèle à l'axe de l'arbre (**joints axiaux**).

Un joint pour mouvement tournant qui est utilisé dans des conditions de vitesse de rotation périphérique et sous une pression du fluide déterminée peut fonctionner avec d'autres caractéristiques à condition de respecter le produit (pression \times vitesse) égal à une constante, produit désigné par PV (exprimé en $\text{MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$). Cela n'est vrai que dans des conditions bien déterminées, en particulier lubrification, dureté et rugosité de l'arbre, etc., et pour une durée de vie bien définie. En outre, il y a une limite pour la pression et pour la vitesse. Ce produit est intéressant à connaître car il caractérise bien un joint, toutefois il ne faut pas attacher une trop grande précision à cette valeur dont on ne connaît souvent que l'ordre de grandeur.

7.3.2.1 Matériaux pour joints en rotation

Les mêmes matériaux que pour les joints pour mouvement de translation sont utilisés dans la réalisation des joints pour mouvement tournant. Il faut noter en plus, pour les garnitures mécaniques, des revêtements du type carbure (nickel, tungstène, etc.) ou nitrure, ainsi que des céramiques.

7.3.2.2 Formes des joints radiaux

7.3.2.2.1 Joints toriques

Le joint torique à section circulaire convient pour des vitesses lentes (inférieures à $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) et pour des pressions élevées (jusqu'à 10 MPa).

L'ordre de grandeur du facteur PV est de 1 pour des durées de vie de l'ordre de 200 à 500 h et de 0,1 pour des durées de l'ordre de 5 000 h, cela avec une lubrification abondante à l'huile et avec un diamètre d'arbre d'environ 30 mm. En effet, la section de l'arbre permet l'évacuation d'une partie de la chaleur qui varie suivant le carré du rayon. Un arbre de gros diamètre permet donc un meilleur facteur PV .

Le montage doit être particulier : le joint torique est toujours logé dans une gorge usinée dans l'alésage, il subit au montage une compression périphérique d'environ 5 % ; le diamètre intérieur du joint libre est donc supérieur de 5 % à celui de l'arbre. De même, il est soumis à une compression transversale de 5 % s'exerçant sur sa section ; la profondeur de la gorge doit être inférieure de 5 % au diamètre du joint libre.

Pour connaître les variations engendrées par ces compressions, on peut utiliser le tableau ci-après ou *règle de Guldin* : la modification d_g de la section du tore d_j est fonction de la contraction ou de l'allongement D_{mg} du diamètre moyen D_m ($D_m = d_1 + d_j$ et d_1 diamètre intérieur du joint), telle que :

D_{mg} en % de D_m	d_g en % de d_j
99	100,503
98	101,015
97	101,535
96	102,062
95	102,598
90	105,409
85	108,465
80	111,803

Exemple : soit un joint torique de diamètre moyen $D_m = 30 \text{ mm}$ et de diamètre de corde libre $d_j = 3 \text{ mm}$. Si l'on comprime de 5 % le diamètre moyen, il devient D_{mg} :

$$D_{mg} = \frac{95 \times 30}{100} = 28,5 \text{ mm}$$

et le diamètre de corde d_j devient d_g (tableau ci-avant) :

$$d_g = \frac{3 \times 102,598}{100} = 3,078 \text{ mm}$$

et par suite les diamètres extérieur et intérieur respectivement 31,578 mm et 25,422 mm.

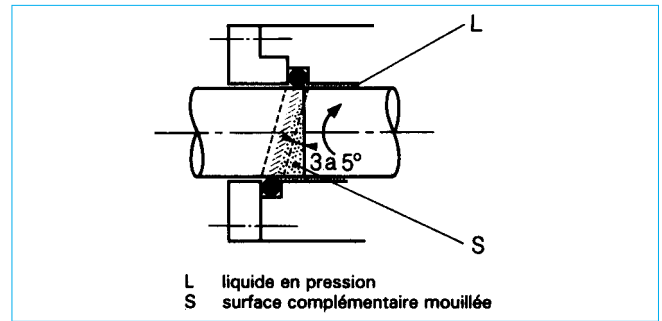


Figure 84 - Montage d'un joint tournant dans une gorge inclinée

Le couple C_{jt} donné par un joint torique en rotation est sensiblement égal à :

$$C_{jt} = C_0 + C_p$$

$$C_0 = \frac{\pi \alpha d_j d^2}{2}$$

avec

α est un coefficient donné par la figure 51a et il dépend lui-même du coefficient ξ de compression radiale du joint calculé par :

$$\xi = 100 \left[\left(\frac{2 D_m}{d + D_g} \right) 1/2 - \frac{D_g - d}{2 d_j} \right]$$

et de

$$C_p = \pi k_p \cdot P \cdot d_j (d + d_j)$$

avec k_p coefficient qui dépend de la nature de l'élastomère, de sa dureté, du rapport d_j/d et de la lubrification. Pour une dureté de l'ordre de 80 Shore, avec de l'huile, k_p est voisin de 10^{-4} .

Un montage intéressant consiste à placer le joint torique dans une gorge légèrement inclinée par rapport à l'axe de l'arbre (angle de l'ordre de 5°). La surface frottante de l'arbre (figure 84) est mieux lubrifiée et se renouvelle devant le joint. La durée de vie est très nettement augmentée. Le joint torique à section quadrilobe peut être utilisé pour des mouvements de rotation avec un montage identique à celui du joint à section circulaire ; ses performances sont comparables, même un peu supérieures.

7.3.2.2.2 Joints composites

Constitués par une bague en matériau plastique (principalement en PTFE chargé) frottant sur l'arbre et un joint torique statique, ils assurent de bonnes performances en mouvement de rotation.

Pour des durées de vie de l'ordre de 1 000 à 5 000 h, le facteur PV est d'environ 2, la vitesse limite de $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et la pression de 8 MPa. Toutefois, ces joints nécessitent un excellent centrage de l'arbre, le faux-rond devant être inférieur à 0,01 à 0,02 mm.

7.3.2.2.3 Joints à lèvres

Ils sont très courants. Ils sont constitués par une armature métallique de section en L sur laquelle est surmoulée une partie en élastomère dont la forme de base est celle donnée en figure 85, avec de nombreuses variantes de détail. L'étanchéité a lieu sur la lèvre dont la section en contact avec l'arbre doit être très faible.

Il existe aussi des joints qui peuvent être montés sur l'arbre et qui assurent le mouvement relatif sur l'alésage.

Le facteur PV des joints à lèvres dépend de l'élastomère utilisé. Il est de l'ordre de 0,5 pour des joints en nitrile avec une vitesse périphérique maximale de $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et de 1,5 pour des joints en élastomère fluoré avec une vitesse maximale de $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Leur tenue en pression est très faible, normalement inférieure à 0,05 MPa. Toutefois il est possible de les faire travailler jusqu'à 1 MPa, les

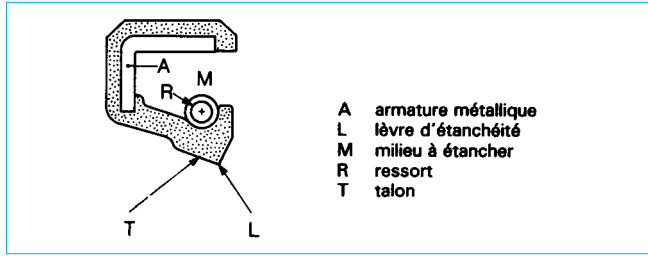


Figure 85 – Section d'un joint à lèvres

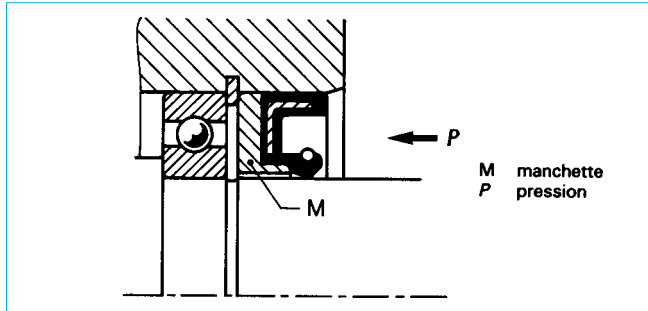


Figure 86 – Joint à lèvres pour pression moyenne

vitesse ne dépassant pas alors quelques mètres par seconde, en utilisant une manchette de soutien (figure 86).

Les joints à lèvres nécessitent de ne pas dépasser certaines valeurs de défauts, en particulier du point de vue de l'excentration et du faux-rond (ou fouettement de l'arbre). Les valeurs maximales sont données sur la figure 87 en fonction soit du diamètre, soit de la vitesse de rotation de l'arbre, respectivement pour ces deux défauts.

De même, la rugosité de l'arbre doit être assez faible mais pas trop, car il y a alors risque d'usure prématurée. La figure 88 donne la zone de rugosité la meilleure. De même, il est nécessaire de pratiquer une rectification en plongée au droit de la lèvre.

La dureté doit être importante, toujours supérieure à HV 600.

Il est parfois intéressant de rapporter une bague traitée sur l'arbre (figure 89), qui peut être alors constituée d'un matériau quelconque et qui permet un changement facile en cas d'usure prématurée.

La puissance dissipée par un joint à lèvres n'est pas négligeable et peut être estimée à l'aide des courbes de la figure 90.

Les joints à lèvres ont un fonctionnement amélioré, en particulier une durée de vie augmentée, si des petites rainures obliques par rapport aux génératrices de l'arbre sont faites au voisinage de la lèvre (figure 91). Ces rainures produisent un refoulement du liquide qui tend à s'échapper et assurent une amélioration de la lubrification de la lèvre lorsque se produit ce régime hydrodynamique. Enfin, suivant le même principe qu'avec le joint torique monté dans une gorge inclinée (figure 84), la lèvre peut avoir un déve-

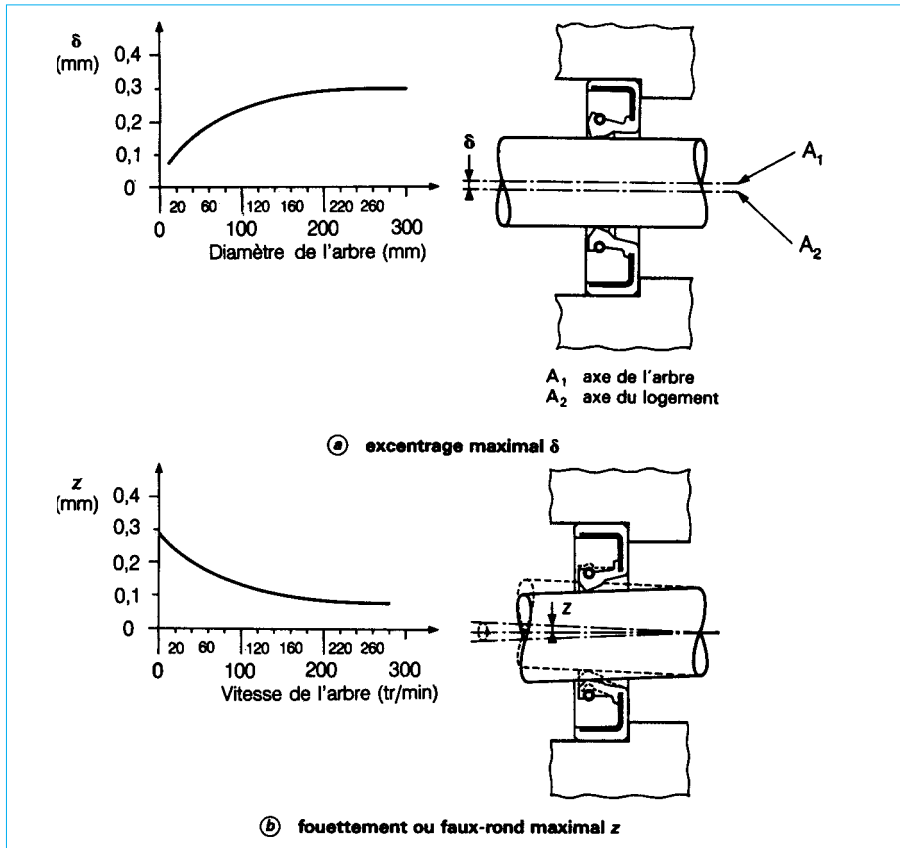


Figure 87 – Excentration et fouettement maximaux d'un joint à lèvres

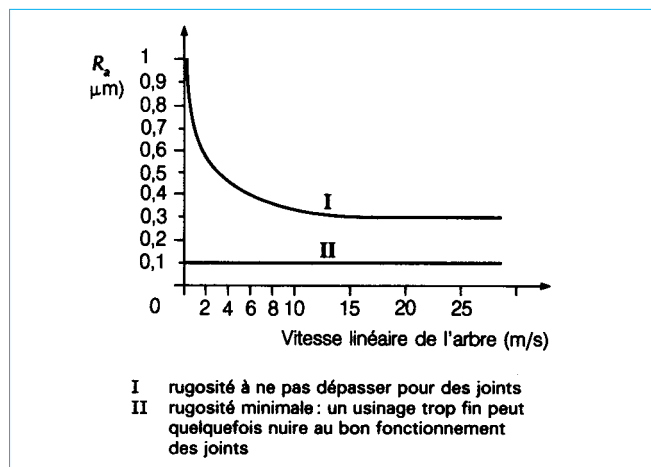


Figure 88 – Rugosité recommandée de l'arbre pour un joint à lèvres

loppé sinusoïdal : c'est le joint à vague (figure 92), qui se traduit par un meilleur refroidissement, moins de friction, grâce à une lubrification améliorée.

7.3.2.2.4 Tresses ou garnitures

Les tresses utilisées en mouvement de translation peuvent l'être aussi en mouvement de rotation. Par suite de l'échauffement localisé, il est presque toujours indispensable d'avoir une injection de

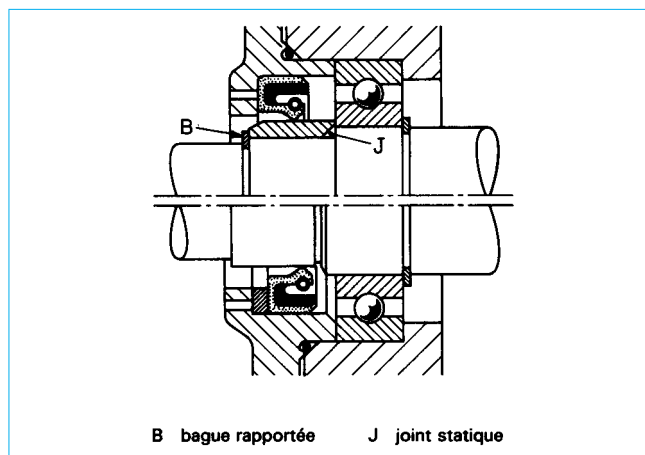


Figure 89 – Étanchéité sur bague rapportée

lubrifiant en milieu de garniture (figure 93), qui est donc constituée de deux demi-parties séparées par une bague. En outre, il y a intérêt, surtout si la vitesse et la pression sont relativement élevées, à extraire la chaleur de frottement par une chemise d'eau qui enveloppe les garnitures (figure 94).

Les tresses permettent des produits PV de 10 avec une vitesse périphérique de $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et une pression maximale de 10 MPa.

Elles sont beaucoup utilisées dans les pompes centrifuges.

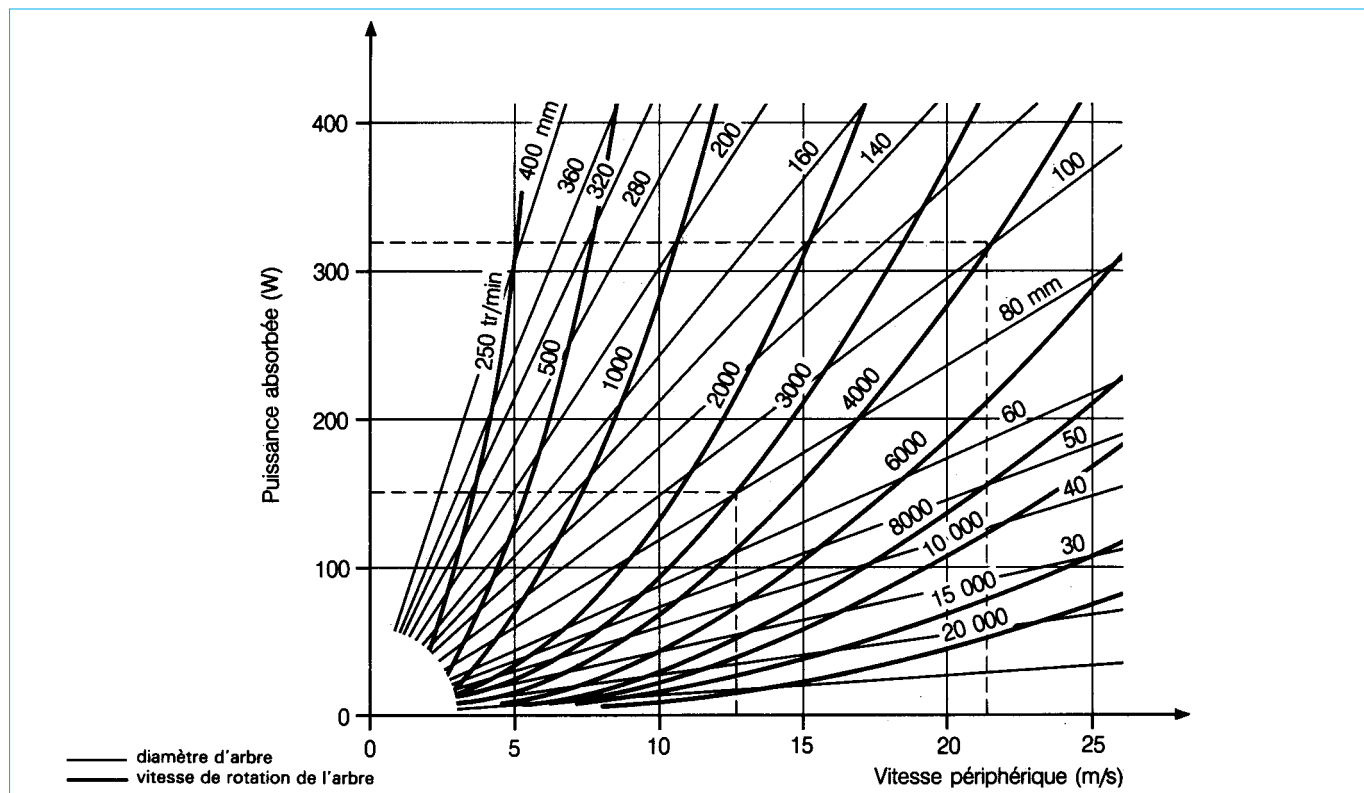


Figure 90 – Puissance dissipée par un joint à lèvres (avec huile SAE, 20 à 100 °C) (d'après doc. SIMRIT)

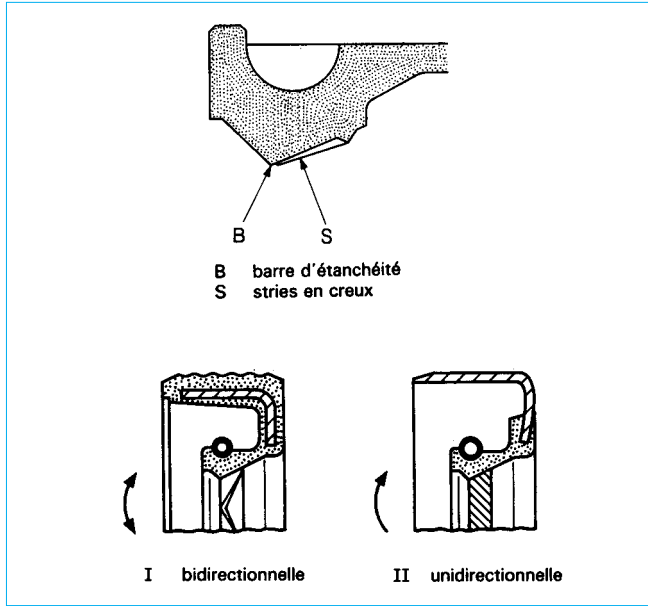


Figure 91 – Joint à lèvres avec stries

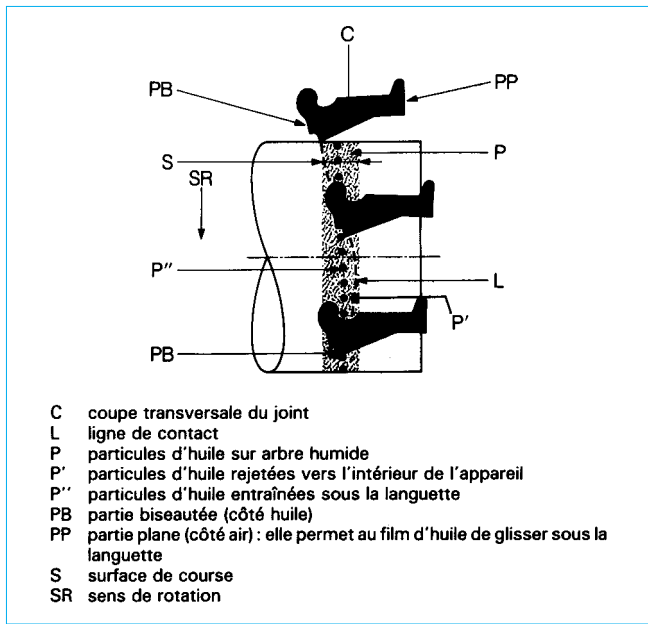


Figure 92 – Joint à lèvres à vague

7.3.2.2.5 Anneaux

Les plus courants sont dits *joints à coins*. Ce sont des anneaux constitués par des secteurs cylindriques dont le nombre augmente avec le diamètre de l'arbre. Les extrémités de chaque secteur possèdent de larges chanfreins permettant l'interposition de coins (figure 95). Secteurs et coins sont maintenus ensemble par un ressort périphérique. Afin d'empêcher la rotation du joint sur l'arbre, des pions sont positionnés sur les faces latérales du boîtier, en regard d'encoches usinées dans les secteurs.

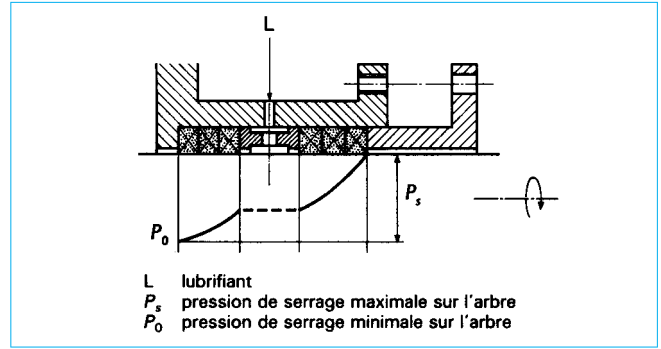


Figure 93 – Presse-garniture avec injection de lubrifiant

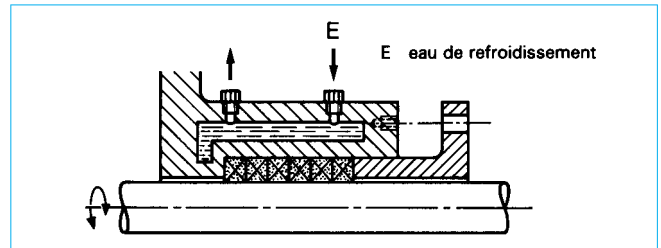


Figure 94 – Presse-garniture avec chemin de refroidissement

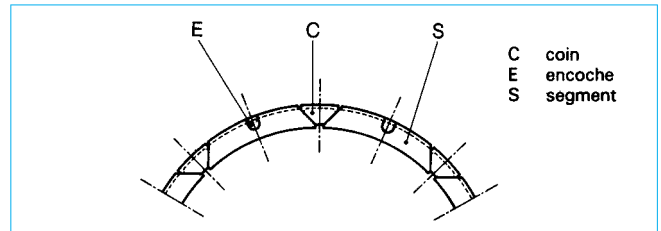


Figure 95 – Joint à anneaux du type coin

Pour obtenir l'étanchéité sur la face latérale du boîtier, on utilise des ressorts de compression qui appliquent les anneaux sur les faces du boîtier (figure 96). De plus, les anneaux sont montés deux par deux de telle sorte que les coins d'un joint soient positionnés en regard des secteurs de l'autre joint.

Ces anneaux sont généralement réalisés en carbone pur ou chargé. Ils sont destinés à des étanchéités destinées surtout aux liquides (quelquefois à la vapeur) pour des grands diamètres (jusqu'à 1,5 m et plus) et pour des vitesses de rotation peu élevées (200 à 300 tr · min⁻¹).

Leurs applications principales sont les turbines hydrauliques et les arbres de bateau.

7.3.2.3 Formes des joints axiaux

7.3.2.3.1 Joints V

C'est un anneau en élastomère de section trapézoïdale serré sur l'arbre et terminé d'un côté par une forme de tronc de cône qui vient s'appliquer sur une surface normale à l'arbre et qui constitue la jonction d'étanchéité (figure 97a). Parfois la section est un peu différente, avec une lèvre d'étanchéité (figure 97b). Ces joints fonctionnent avec des vitesses périphériques allant jusqu'à 15 m · s⁻¹,

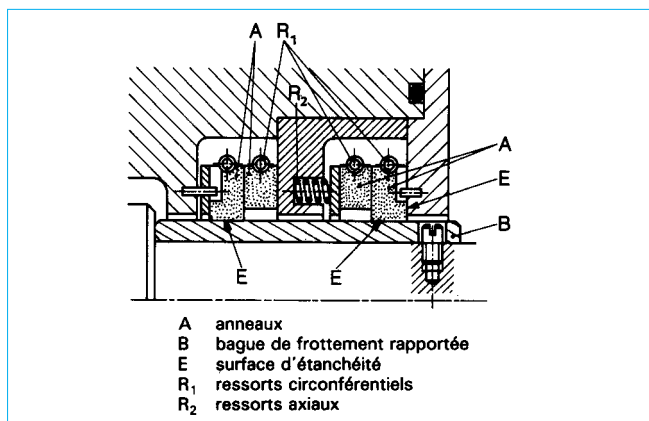


Figure 96 – Joint tournant à anneaux

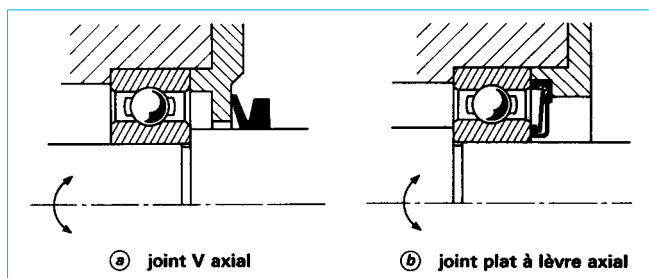


Figure 97 – Joint à lèvres axiales

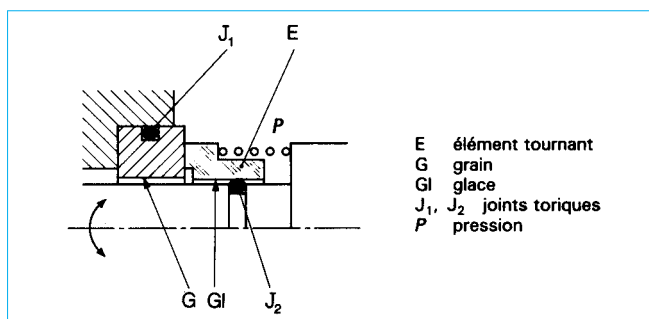


Figure 98 – Garniture mécanique

mais pratiquement sans pression (0,01 MPa) pour des étanchéités à l'huile. Leur utilisation, compte tenu de leur faible comportement en pression, est essentiellement l'étanchéité des roulements ou des paliers.

7.3.2.3.2 Garnitures mécaniques

Une garniture mécanique est un ensemble mécanique assurant l'étanchéité en rotation par deux surfaces planes normales à l'axe de rotation et animées d'un mouvement relatif de l'une par rapport à l'autre.

Elle se compose donc de deux parties principales (figure 98) :

- un demi-joint J₁ solidaire et étanche statiquement de la partie fixe ;
- un autre demi-joint J₂ solidaire et étanche statiquement de la partie mobile.

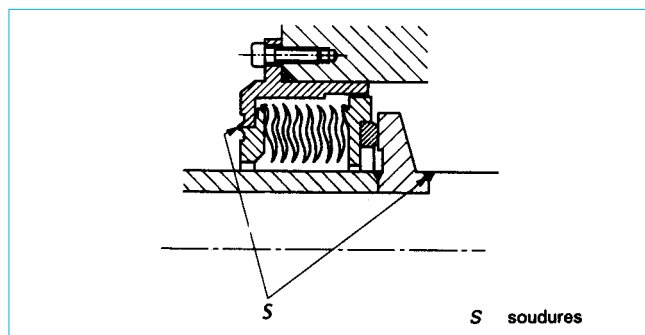


Figure 99 – Garniture mécanique à soufflet soudé

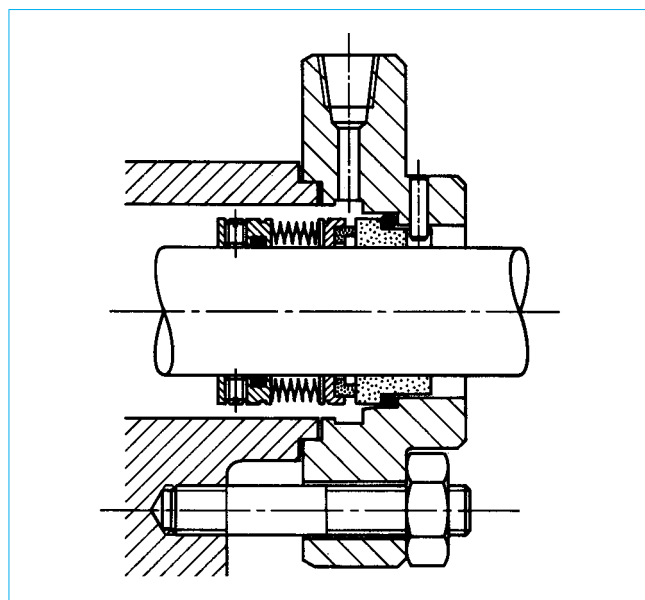


Figure 100 – Garniture mécanique à soufflet et joints toriques

Ces deux demi-parties sont désignées respectivement l'une par *grain fixe*, l'autre par *élément tournant* dont l'élément qui assure l'étanchéité contre le grain s'appelle *glace*. Parfois, l'ensemble tournant peut être l'élément fixe ; le grain est alors mobile par rapport à lui. L'étanchéité statique de ces deux parties est le plus souvent réalisée sur la partie fixe et sur l'arbre par un joint en élastomère. Un ressort appuie l'élément tournant sur le grain pour amorcer l'étanchéité aux faibles pressions. L'élément tournant doit être légèrement mobile dans toutes les directions par rapport à l'arbre de manière à assurer un contact aussi bon que possible entre grain et glace, quels que soient les sollicitations (thermiques en particulier) et les petits défauts de rotation. L'utilisation de joints toriques statiques limitant les possibilités ainsi que celles de l'utilisation de certains fluides ou de températures extrêmes, l'étanchéité de l'élément tournant est parfois réalisée par un soufflet métallique à disques soudés (figure 99), les deux parties de la garniture étant elles-mêmes soudées au boîtier et à l'arbre, ou par une solution mixte, joints toriques et soufflet (figure 100).

La nature des surfaces d'étanchéité ainsi que leur qualité d'exécution sont particulièrement importantes. D'assez nombreux matériaux sont utilisés, le tableau 7 en donne les principaux avec leur domaine d'utilisation. Ces surfaces ont une planéité très bonne,

Tableau 7 – Principaux matériaux frottants pour garnitures mécaniques

Partie fixe	Partie tournante	Observations	Applications principales
Carbone pur ou imprégné de résine ou imprégné de métal	Carbone	Bonne tenue à la corrosion	Industrie chimique
	Acier traité	Assez sensible à la corrosion	
	Stellite	Très bonne tenue thermique	Petit compresseur frigorifique. Pompe à liquide lubrifiant. Sollicitation thermique importante. Pompe à eau industrielle
	Céramique	Bonnes performances. Sensible aux chocs thermiques	Turbine hydraulique. Industrie chimique
	Carbure	Performances élevées	Industrie chimique
	Nitride	Encore très nouveau, très bonnes performances	Industrie chimique. Vapeur
Bronze	Acier traité	Assez sensible à la corrosion. Pour liquide clair et non cristallisable	Petit compresseur frigorifique
	Stellite	Pour liquide clair, non cristallisable	Pompe à eau. Turbine hydraulique industrielle
Céramique	PTFE	Très bonne tenue à la corrosion. Performances modestes	Industrie chimique
	Carbone	Bonne tenue à la corrosion. Bonnes performances	Industrie chimique
Carbures (W, Ti, Ni, ...)	Carbone	Bonnes performances	Industrie chimique
	Carbure	Grande résistance à l'usure, craint les chocs thermiques	Industrie chimique et pétrole
	Stellite	Assez peu utilisé	Industrie chimique et pétrole
	Céramique	Sensible aux tensions thermiques	Industrie chimique et pétrole
Nitrides	Nitride	Grande résistance à l'usure, très nouveau	Industrie avec forte usure

souvent contrôlée à la frange d'interférence, la rugosité étant de l'ordre de 0,03 à 0,01 μm .

La pression du fluide applique les deux surfaces l'une contre l'autre avec un effort F (figure 101a) :

$$F = \lambda_1 (S_2 - S_1) P$$

avec λ_1 coefficient compris entre 0 et 1, fonction de la loi de décroissance de la pression entre les rayons r_2 de S_2 et r_1 de S_1 et qui ne semble guère s'écarter de $0,5 \pm 0,1$. Cette force est répartie sur la surface de contact $S_2 - S_1$. La pression de contact τ est donc très voisine de $\tau = \lambda_1 P$. Pour les pressions élevées (supérieures à 5 MPa) cette pression devient prohibitive. Il y a lieu d'équilibrer le joint, ce qui est facilement réalisé en épaulant l'arbre au droit du joint coulissant C qui assure l'étanchéité entre l'arbre et l'élément tournant (figure 101b). La force F devient alors :

$$F = [\lambda_1 (S_2 - S_1) - (S'_1 - S_1)] P$$

Il est clair qu'une trop grande valeur de S'_1 inverserait le signe de F et ferait décoller le joint.

On définit le coefficient d'équilibrage

$$\mu = \frac{S'_1 - S_1}{S_2 - S_1}$$

égal au rapport de la surface d'équilibrage à la surface de contact.

Cette valeur de μ est d'environ 0,3 pour les largeurs d'appui de grains de l'ordre de 3 mm et décroît jusqu'à 0,15 pour des largeurs de l'ordre de 1 mm.

Le fonctionnement d'une garniture mécanique est satisfaisant à condition de respecter certains impératifs. Le premier est celui d'une lubrification correcte. En effet, en rotation, les deux surfaces

planes ne sont pas directement en contact entre elles, il y a un film hydrodynamique, ou au moins des *épilames*, qui diminue le frottement et l'usure. Il est donc nécessaire que la vitesse ne soit pas trop faible et que le montage soit rigoureux : excentration de l'arbre très faible, bon centrage des éléments les uns par rapport aux autres.

Si le fluide n'est pas un lubrifiant satisfaisant (c'est le cas de tous les gaz, mais aussi de certains liquides), il est nécessaire de monter deux garnitures mécaniques tête-bêche et d'injecter entre les deux un lubrifiant de qualité (figure 102).

Le fluide à étancher ne doit pas venir détériorer les surfaces de frottement, parce qu'il est corrosif, mais aussi parce qu'il contient des particules en suspension. Le montage précédent (figure 102) est alors encore tout indiqué, le lubrifiant étant à une pression légèrement supérieure à celle du fluide à étancher. Il faut aussi veiller au bon refroidissement de la garniture mécanique, ce qui suppose parfois une extraction particulière de la chaleur et en particulier un renouvellement important du fluide de lubrification.

Les garnitures mécaniques assurent une bonne étanchéité. Une garniture qui présente une très légère fuite a souvent une durée de vie nettement plus importante qu'une garniture dont la fuite est sensiblement nulle, car cela signifie qu'il y a bien un film lubrifiant.

Il est possible d'ailleurs de calculer le débit volumétrique de fluide à travers une fente radiale avec un liquide (figure 103) par :

$$Q_v = \frac{\pi R (P_e - P_s)}{6 \eta (R - r)} \cdot \frac{j^3 (R - r)}{R \lg \frac{R}{r}}$$

Les garnitures permettent des performances très élevées, fonction d'ailleurs de la précision de leur réalisation, de la nature des

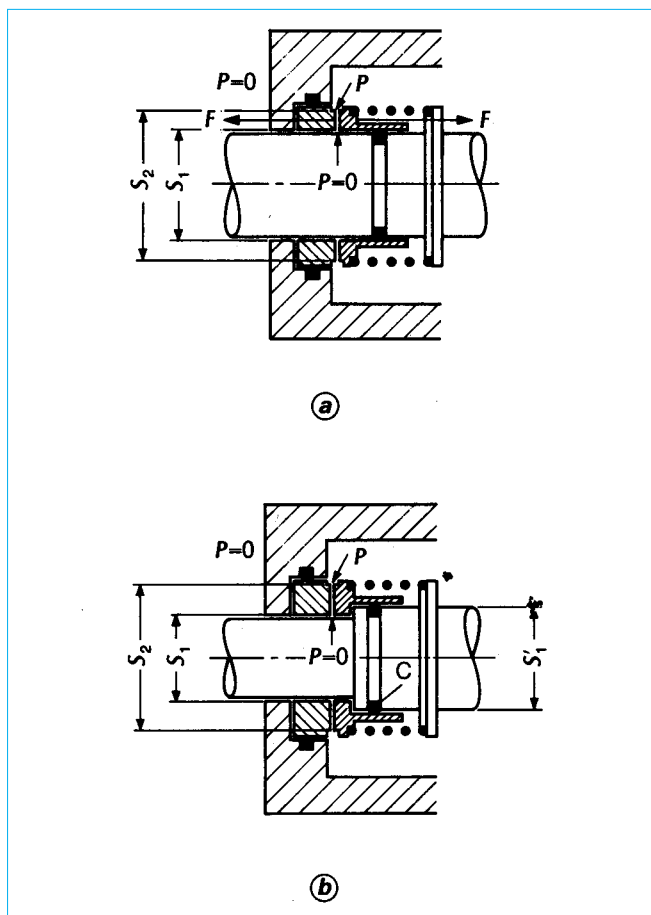


Figure 101 – Action de la pression dans une garniture mécanique

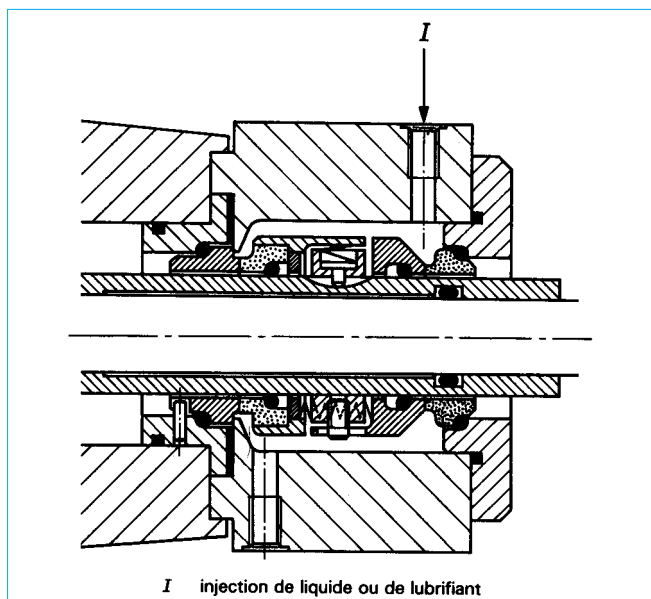


Figure 102 – Garniture mécanique double

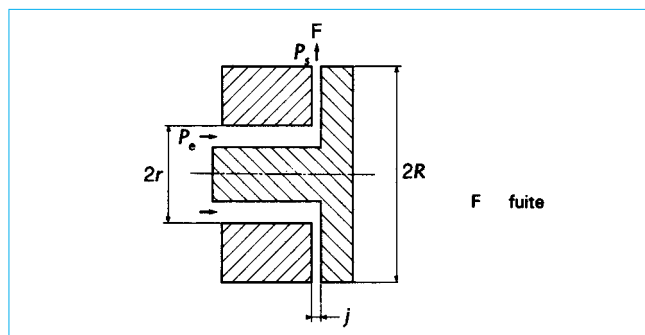


Figure 103 – Fuite par une rainure circulaire radiale

matériaux et donc en définitive de leur prix. Il est possible de les classer en trois catégories :

- applications courantes : PV jusqu'à 1 ;
- applications à bonnes performances : PV jusqu'à 20 ;
- applications à très hautes caractéristiques : PV jusqu'à 300.

Le rapport des prix entre les premières et les dernières peut aller jusqu'à un facteur de 100, à taille égale.

De nombreux constructeurs fabriquent en série des garnitures mécaniques depuis des diamètres de quelques millimètres jusqu'à 500 mm, voire plus. Les applications courantes sont multiples, allant de la machine à laver ou la pompe de voiture au compresseur industriel de plusieurs mégawatts de puissance.

7.3.2.4 Conclusion

Le tableau 8 donne les principaux joints d'étanchéité pour les mouvements de rotation avec leurs caractéristiques.

7.3.3 Précautions à prendre

Pour qu'un joint tournant assure convenablement sa fonction, et avec une durée de vie importante, il est nécessaire de respecter un certain nombre de conditions.

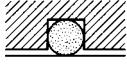

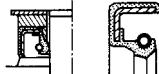




Avec tous les joints, la lubrification doit être abondante en permettant une évacuation de la chaleur, surtout si le produit PV est élevé. Le lubrifiant doit être très propre, il faut éviter toute intrusion de particules solides. L'arbre doit tourner avec une excentricité très faible (souvent inférieure à 0,01 mm, surtout avec les garnitures mécaniques). Le montage du joint doit être soigné ; en particulier, il faut éviter absolument de détériorer, même de manière minime, les parties assurant l'étanchéité dynamique ou statique. Cela suppose la présence de chanfreins de faibles pentes et suffisamment importants aux changements de diamètre de l'arbre sur lequel est monté ce joint. D'une manière générale, toute partie pouvant blesser le joint (trou, filetage, etc.) doit être étudiée dans ce sens. Il s'agit là de causes fréquentes de défauts d'étanchéité.

En ce qui concerne les joints radiaux, l'arbre doit avoir une grande dureté (supérieure à 600 HV).

Des revêtements ou des traitements thermiques permettent d'améliorer la durée de vie, tels le chromage dur, ou la cémentation. Toutefois, certains traitements peuvent avoir un effet négatif suivant la nature du joint et le fluide à étancher.

La rugosité doit être faible (valeur moyenne $R_a = 0,2 \mu\text{m}$). Toutefois, il ne faut pas descendre trop bas, car alors l'usure augmente. De même, il est très souhaitable, pour les joints à faible portée, tels les joints à lèvres (figures 97 et 98), de terminer l'usinage de la partie frottante par une rectification en plongée afin d'éliminer les rayures hélicoïdales qui sont sources de fuite.

Tableau 8 – Joints d'étanchéité pour mouvement de rotation les plus intéressants

Type	Schéma	Matériaux	Vitesse maximale $m \cdot s^{-1}$	Pression maximale MPa	Facteur PV maximal (1) $MPa \cdot m \cdot s^{-1}$	Température maximale $^{\circ}C$	Observations	Applications	
Radiaux	Torique (§ 7.3.2.2.1)		Élastomère	0,5	10	1	200	Bonne lubrification nécessaire. Montage incliné intéressant	Dispositif nécessitant un faible encombrement. Indifférent au sens de pression
	Composite (§ 7.3.2.2.2)		Élastomère, matière plastique (PTFE)	2	8	2	220	Nécessité d'une rugosité très fine. Coût nettement plus élevé que joint torique seul	Dispositif à faible encombrement, faible couple. Indifférent au sens de pression
	À lèvres (§ 7.3.2.2.3)		Élastomère, acier	25	0,05 à 1 (avec renfort)	1,5	180	Nécessité d'une bonne lubrification. Rectification en plongée de l'arbre. Prix peu élevé	Dispositif à vitesse élevée mais faible pression. Sortie de boîte de vitesses, arbre de roue, etc.
	Tresses (§ 7.3.2.2.4)		PTFE, graphite	20	10	10	400 à 600	Nécessité d'une période de rodage et d'une reprise de serrage	Pompes rotatives diverses et fluides agressifs
	Anneaux (§ 7.3.2.2.5)		Carbone, bronze chargé	15	10	2,5	400	Assez coûteux et étanchéité souvent avec légère fuite	Pour arbre de pompe à frottement assez faible
Axiaux	V (§ 7.3.2.3.1)		Élastomère	15	0,01	0,1	100	Intérêt pour arbre quelconque, plaque de frottement durcie	Étanchéité de roulement sous faible pression
	Garniture mécanique (§ 7.3.2.3.2)		Carbone, acier, céramique, carbure, PTFE, élastomère	100	25	300	400	Coût assez élevé. Nécessite un très bon montage et bonne qualité de rotation. Lubrification impérative	Emploi étendu pour matériel à performances élevées

(1) Le facteur PV n'est qu'un ordre de grandeur et sous réserve d'une bonne lubrification et d'une évacuation de la chaleur.

Étanchéité en mécanique

Normalisation

France

Association Française de Normalisation AFNOR

NF EN 1779	Déc. 1999	Essais non destructifs, contrôle d'étanchéité. Critères de choix de la méthode et de la technique. Indice de classement : A09-105.
NF EN 1779/A1	Juil. 2004	Essais non destructifs, contrôle d'étanchéité. Critères de choix de la méthode et de la technique. Indice de classement : A09-105/A1.
NF A09-106	Mai 1979	Contrôle d'étanchéité à l'aide d'ammoniac. Localisation des fuites par pressurisation d'ensemble.
NF A09-107	Mai 1979	Contrôle d'étanchéité à l'aide d'ammoniac. Localisation des fuites. Méthode à la ventouse.
NF EN 1593	Nov. 1999	Essais non destructifs. Contrôle d'étanchéité. Contrôle à la bulle. Indice de classement : A09-108.
NF EN 1593/A1	Juil. 2004	Essais non destructifs. Contrôle d'étanchéité. Contrôle à la bulle. Indice de classement : A09-108/A1.
NF A09-493	Mai 1990	Essais non destructifs. Contrôle d'étanchéité. Pratiques recommandées pour le contrôle par ressuage sous vide à l'aide d'hélium.
NF A09-110	Oct. 1980	Contrôles d'étanchéité. Pratiques recommandées pour la recherche de fuites à l'aide de gaz sous pression.
NF EN 12756	Avril 2001	Garnitures mécaniques d'étanchéité. Dimensions principales, désignation et codes matériaux. Indice de classement : E44-170.
NF F20-028	Mars 1950	Tampons autoclaves. Joints.
NF L40-114	Déc. 1987	Aéronautique et espace. Raccordements à étanchéité radiale. Joints toriques. Dimensions.
NF L43-603	Sept. 1974	Raccordements à bride. Joints toriques.
NF L46-323	Déc. 1980	Joints plats en élastomère pour chapeaux de protection.
NF R93-920	Déc. 1993	Véhicules routiers. Joints circulaires d'étanchéité.
NF R99-202	Sept. 1966	Papiers et cartons pour joints utilisés dans la construction automobile.
NFT46-003	Nov. 1973	Caoutchouc et élastomères analogues. Essai de dureté internationale des caoutchoucs vulcanisés (30A 94 D.I.D.C).

NFT46-011	Déc. 1991	Caoutchouc vulcanisé ou thermoplastique. Détermination de la déformation rémanente après compression aux températures ambiantes, élevées ou basses.
NFT46-013	Déc. 1985	Caoutchouc vulcanisé ou thermoplastique. Détermination de l'action des liquides.
NFT47-301	Juin 1972	Bagues et profilés en élastomère moulés et extrudés pour joints de canalisations. Caractéristiques générales des matériaux.
NFT48-001	Juin 1994	Feuilles en amiante et caoutchouc comprimés pour joints. Caractéristiques. Marquage et étiquetage.
NFT48-101	Nov. 1994	Feuilles en amiante et caoutchouc comprimés pour joints. Mesure des dimensions.
NFT48-103	Nov. 1994	Feuilles en amiante et caoutchouc comprimés pour joints. Détermination de la résistance à la traction.
NFT48-104	Juin 1994	Feuilles en amiante et caoutchouc comprimés pour joints. Détermination de la perte au feu.
NFT48-105	Nov. 1994	Feuilles en amiante et caoutchouc comprimés pour joints. Essai d'immersion dans les liquides.
NFT48-108	Nov. 1994	Feuilles en amiante et caoutchouc comprimés pour joints. Détermination de la tenue au cintrage.
NFT48-109	Nov. 1994	Feuilles en amiante et caoutchouc comprimés pour joints. Essai de vieillissement accéléré en étuve.

Normes internationales

International Organization for Standardization ISO

ISO 3601-1	2002	Transmissions hydrauliques et pneumatiques. Joints toriques. Partie 1 : diamètres intérieurs, sections, tolérances et code d'identification dimensionnelle.
ISO 5597	1987	Transmissions hydrauliques. Vérins. Logements de joints d'étanchéité pour pistons et tiges de piston. Dimensions et tolérances.
ISO 6194-1	1982	Bagues d'étanchéité à lèvres pour arbres tournants. Partie 1 : dimensions nominales et tolérances.

Index bibliographique

- | | | |
|--|--|--|
| [1] MARTIN (J.). – <i>Manuel de l'étanchéité en mécanique</i> . P.P.I.-C.C.P. 1981. | [7] LEMASSON (G.) et TOURANGEAU (A.L.). – <i>Éléments de construction à l'usage de l'ingénieur</i> . Tome IX. 1964. Dunod. | [12] BUCHTER (H.H.). – <i>Industrial sealing technology</i> . 1979. John Wiley and Sons. |
| [2] BLANC (B.), HENRY (R.P.) et LECLERC (J.). – <i>Guide de l'étanchéité</i> . 1981. SFV. | [8] <i>Traité pratique de technique du vide</i> . Assoc. Nat. Rech. Techn. 1958. | [13] RIOU (J.). – <i>Étude du fonctionnement des presse-garnitures. État au montage</i> . Note Technique n° 14. 1976. CETIM. |
| [3] MAYER (E.). – <i>Garnitures mécaniques d'étanchéité</i> . 1972. Dunod. | [9] DELAFOSSE (J.) et MONGODIN (G.). – <i>Les calculs de la technique du vide</i> . 1961. | [14] <i>Fluid sealing</i> . Conférences internationales tous les 2 ans dont les actes sont publiés par British Hydrodynamic Research Association (BHRA). |
| [4] WARRING (R.H.). – <i>Seals and packings</i> . 1979. Trade and Technical Press Ltd. | [10] ROTH (R.). – <i>Vacuum Sealing Technics</i> . 1966. Pergamon Press. | [15] IDELC'IK. – <i>Mémento des pertes de charge</i> . 1969. Eyrolles. |
| [5] WARRING (R.H.). – <i>Seals and sealing handbook</i> . 1981. Trade and Technical Press Ltd. | [11] <i>Les joints d'étanchéité dans la construction mécanique</i> . Mécanique/Matériaux/Électricité n° 265.4. 1972. | |
| [6] ROTHBART (H.A.). – <i>Mechanical design and systems handbook</i> . Section 24 1964. McGraw Hill. | | |

f3003 Évaporation - Principes généraux

Date de publication : 10/06/2009

Par :

Martine DECLOUX

Professeur de génie des procédés à AgroParisTech

Bernard RÉMOND

Responsable R & D Évaporation, GEA Process Engineering France

Cet article fait partie de la base documentaire :

Opérations unitaires du génie industriel alimentaire

Dans le pack : **Agroalimentaire**

et dans l'univers : **Procédés chimie - bio - agro**



Cet article peut être traduit dans la langue de votre choix.

Accédez au service *Traduction à la demande* dans votre espace « Mon compte ». (Service sur devis)

Document délivré le : 17/12/2014

Pour le compte : 7200034092 - // nc EDITIONS TECHNIQUES INGENIEUR // 217.109.84.129

Pour toute question :

Service Relation clientèle - Techniques de l'Ingénieur

249 rue de Crimée - 75019 - Paris

par mail infos.clients@teching.com ou au téléphone 00 33 (0) 1 53 35 20 20

Évaporation

Principes généraux

par **Martine DECLoux**

Professeur de génie des procédés à AgroParisTech

et **Bernard RÉMOND**

*Responsable R & D Évaporation
GEA Process Engineering France*

1. Données de base pour l'eau, la vapeur d'eau et les solutions	F 3 003 - 3
1.1 Caractéristiques de l'eau et de la vapeur d'eau.....	— 3
1.2 Influence des matières sèches dissoutes sur l'ébullition des solutions	— 6
2. Évaporateur simple effet et auxiliaires	— 9
2.1 Circuits d'un évaporateur simple effet et auxiliaires	— 9
2.2 Écriture des bilans.....	— 11
2.3 Estimation du coefficient de transfert de chaleur global.....	— 14
3. Données sur l'eau et sur la vapeur saturante.....	— 15
Pour en savoir plus	Doc. F 3 003

La transformation des produits alimentaires nécessite fréquemment une étape intermédiaire de concentration par évaporation. Les solutions sont le plus souvent des solutions aqueuses.

La plupart des unités fonctionnent en continu, même si elles sont arrêtées à des fréquences plus ou moins longues pour un nettoyage chimique de quelques heures. La durée de fonctionnement entre deux nettoyages est très différente selon les produits (douze heures pour du lactosérum à trois mois pour du jus sucré de betterave).

Cet article sur l'évaporation en industrie alimentaire a pour objectif de présenter les principes de la concentration par évaporation, d'illustrer les différents modes de mise en œuvre, de traiter des applications en industrie alimentaire et, enfin, de mentionner les questions à se poser en vue de l'installation d'une nouvelle unité.

La première partie [F 3 003] reprend les principes généraux, en particulier la détermination des données utiles à l'écriture des bilans. La seconde partie [F 3 004] décrit la mise en œuvre des évaporateurs, leur agencement afin d'économiser l'énergie et, pour conclure, les questions à se poser lorsque l'implantation d'un nouvel évaporateur est envisagée.

Le lecteur pourra utilement se reporter aux **diagrammes de l'air humide** :

- basses températures [Ann. J 2 451] ;
- moyennes températures [Ann. J 2 452] ;
- hautes températures [Ann. J 2 453].

Notations et symboles		
Symbole	Unité	Désignation
A	m^2	Surface d'échange
AS		Air sec
a_w		Activité de l'eau de la solution
CEM	$\text{kJ/kg eau évaporée}$	Consommation énergétique massique
$COP = \frac{\dot{Q}}{\dot{W}}$		Coefficient de performance : $COP = \frac{\text{énergie thermique échangée}}{\text{énergie mécanique fournie}}$
C_p	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ou $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$	Capacité thermique massique à pression constante
C_V	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ou $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$	Capacité thermique massique à volume constant
EE	°C	Élévation ébullioscopique
Ee, Es		Eau entrée et eau sortie
$e_p, e_{\text{dépôt}}$	m	Épaisseur de la paroi, épaisseur du dépôt
°F	$10 \text{ mgCaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$	Degré français de dureté de l'eau (due principalement aux sels de calcium et magnésium). Équivaut à $10 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$ ou 4 mgCa/L ou $2,43 \text{ mgMg/L}$
H	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	Enthalpie massique
h_G	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ou $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}$	Coefficient de transfert global
H_L, H_V, H_{ed}	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	Enthalpies du liquide, de la vapeur, de l'eau de désurchauffe...
\dot{m}	$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	Débit massique ($\dot{m}_L, \dot{m}_{Vi} \dots$)
MM	$\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$	Masse molaire ($MM_{\text{eau}} = 18 \text{ g/mol}$)
n		Nombre d'effets dans un évaporateur multiple effet
p	Pa ou bar	Pression de vapeur
p_c	Pa ou bar	Pression critique = 220,55 bar (eau)
$p_{\text{eau}}^{\text{sat}}$	Pa ou bar	Pression de vapeur saturante de l'eau pure à une température donnée
\dot{Q}	$\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$ ou W ou kW	Énergie thermique échangée par unité de temps, puissance
r	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ou $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$	Constante d'un gaz idéal ($r_{\text{eau}} = 0,4615 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
R	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Constante molaire des gaz ($8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
$s_{\text{col tuyère}}$	m^2	Section du col de tuyère du thermocompresseur
T	kelvin	Température absolue
T_c	kelvin	Température critique (647,13 K ou 374 °C pour l'eau)
TH	°F	Titre hydrotimétrique, indice de la dureté de l'eau
$v_{\text{col tuyère}}$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Vitesse de la vapeur motrice au niveau du col de la tuyère du thermocompresseur
x	$\text{kg}_{\text{vapeur}}/\text{kg}_{\text{mélange}}$	Titre en vapeur des mélanges vapeur saturante – eau liquide à température d'ébullition (diagramme de Mollier)
x_L		Fraction massique en solutés ou « matières sèches » du liquide L
X_L		Fraction molaire en solutés ou « matières sèches » du liquide L
Y	$\text{kg eau} \cdot (\text{kg air sec})^{-1}$	Teneur en eau de l'air
$z = \frac{\dot{m}_{\text{vapeur aspirée}}}{\dot{m}_{\text{vapeur motrice}}}$		Coefficient de reprise d'un thermocompresseur

Notations et symboles (suite)		
Symbole	Unité	Désignation
$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$		Coefficient isentropique : rapport des capacités thermiques massiques à pression constante (C_p) et à volume constant (C_v) d'un gaz parfait
γ_{eau}		Coefficient d'activité de l'eau
$\delta = \frac{P_{\text{vapeur refoulée}}}{P_{\text{vapeur aspirée}}}$		Rapport (ou taux) de compression
$\eta_{\text{isentropique}}$		Rendement isentropique (au sens par rapport à l'isentrope)
$\eta_{\text{mécanique}}$		Rendement mécanique
$\eta_{\text{électrique}}$		Rendement électrique
θ	°C	Température
θ_L^{eb}	°C	Température d'ébullition du liquide L
θ_V^{sat}	°C	Température de vapeur saturante d'une vapeur V
$\Delta\theta_{\text{utile}}$	°C	Écart de température utile au transfert de chaleur
$\Delta\theta_{\text{nuisible}}$	°C	Écart de température nuisible (qui ne participe pas au transfert de chaleur)
κ		Coefficient polytropique : rapport des capacités thermiques massiques à pression constante (C_p) et à volume constant (C_v) d'un gaz idéal (dépend de la température)
$\lambda_p, \lambda_{\text{dépôt}}$	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Conductibilité thermique de la paroi, du dépôt

1. Données de base pour l'eau, la vapeur d'eau et les solutions

Les solutions concernées par la concentration en industrie alimentaire sont le plus souvent des solutions aqueuses. Aussi, avant de décrire les circuits d'un évaporateur, avons-nous fait le choix de regrouper, dans une première partie, les données sur l'eau, la vapeur d'eau et les solutions avec solutés.

1.1 Caractéristiques de l'eau et de la vapeur d'eau

1.1.1 Pression de vapeur d'eau

Il est impossible de parler de concentration par évaporation sans revenir sur la notion de pression de vapeur d'eau exercée par l'eau et le phénomène d'ébullition.

Quelle que soit la température, l'eau liquide exerce une certaine pression de vapeur d'eau. Celle-ci peut être calculée à partir de l'équation (1) dont les coefficients sont issus de la base thermodynamique *Component Plus de ProSim SA* :

$$p = \exp\left(73,649 - \frac{7\,258,2}{T} - 7,3037 \ln(T) + 4,1653 \cdot 10^{-6} \cdot T^2\right) \quad (1)$$

avec T en kelvins et p en pascals absolus.

Cette relation est valable entre 273,15 et 647 K (de 0 à 374 °C).

La pression de vapeur augmente jusqu'au point critique, point au-delà duquel l'eau n'existe plus que sous une seule phase (figure 1).

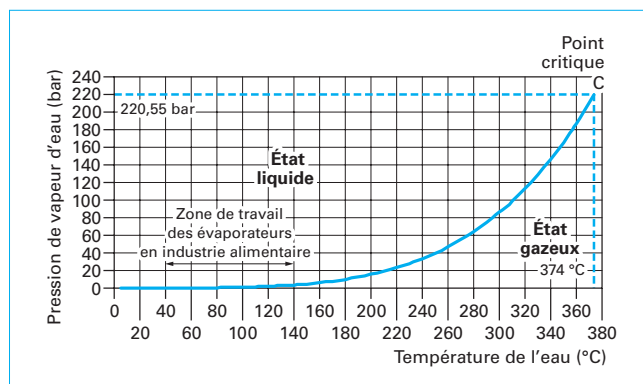


Figure 1 – Relation entre la température de l'eau et la pression de vapeur d'eau

1.1.2 Température d'ébullition de l'eau (absence de solutés)

L'eau pure est dite « à sa température d'ébullition d'équilibre » quand la pression de vapeur exercée par celle-ci est égale à la pression ambiante. On parle également de pression de vapeur saturante. De nombreuses relations et tables (§ 3) permettent de déterminer la température d'ébullition de l'eau en fonction de la pression. Génotelle [15] propose l'équation (2) :

$$\theta = \frac{1\,168,4 + 228,42 \ln(p)}{11,727 - \ln(p)} \quad (2)$$

avec θ en °C et p en bar abs.

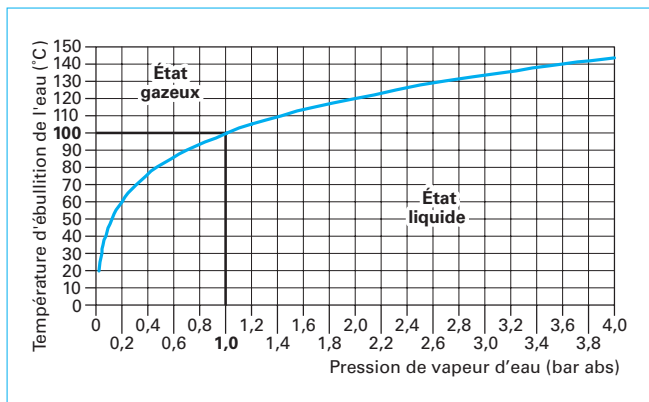


Figure 2 – Lien pour l'eau entre température et pression dans le domaine des basses pressions

Cette relation est valable avec moins de 0,5 % d'erreur entre 0,02 bar et 128 bar.

Dans les évaporateurs de l'industrie alimentaire, compte tenu de la thermosensibilité des solutions traitées, le domaine de pression utilisé est généralement situé entre 0,1 et moins de 4 bar. Dans celui-ci, la température d'ébullition de l'eau varie fortement avec la pression (figure 2).

1.1.3 Influence de la présence des gaz incondensables sur la température de condensation de la vapeur d'eau

En présence d'air ou d'autres gaz incondensables dans la vapeur, la pression partielle de vapeur d'eau n'est qu'une fraction de la pression totale. À une pression totale donnée, elle est donc inférieure à celle qu'elle aurait en absence de gaz incondensable. Cela entraîne une baisse de la température de condensation. Pour illustrer ce phénomène, nous avons, à partir de pourcentages en masse d'air présents dans la vapeur d'eau, calculé les fractions molaires de l'air et de la vapeur d'eau en considérant comme masses molaires 28,8 g/mol pour l'air et 18 g/mol pour l'eau. Nous en avons déduit la pression partielle de vapeur d'eau puis la température d'ébullition correspondante à l'aide de l'équation (2), et ainsi la chute de température induite par la présence de l'air, en soustrayant à cette température celle qu'aurait eu l'eau s'il n'y avait eu que de la vapeur d'eau pour la pression totale considérée. Nous avons reporté ces calculs sur la figure 3 en considérant un pourcentage en masse d'air jusque 20 % et la zone de pression de 0 à 4 bar abs.

On constate que la présence d'une importante quantité d'air réduit significativement la température de condensation de la vapeur. Sachant que certains appareils fonctionnent avec des écarts de température très faibles entre la vapeur de chauffage et le liquide à l'ébullition côté calandre, une chute de 0,3 °C sur, par exemple, 3 °C représente déjà une réduction de l'écart de température utile au transfert de 10 %, ce qui est loin d'être négligeable. Il faut signaler que, dans le cadre de l'optimisation énergétique d'un site, il arrive que la vapeur de chauffage utilisée dans un évaporateur soit issue du séchage d'un produit, d'où une forte teneur en gaz incondensable. Ce phénomène doit donc être considéré.

1.1.4 Enthalpie de l'eau liquide

L'enthalpie est la quantité d'énergie contenue dans un corps. Elle est le plus souvent exprimée en kJ/kg. Par convention, l'origine de l'échelle des enthalpies est l'eau liquide à 0 °C.

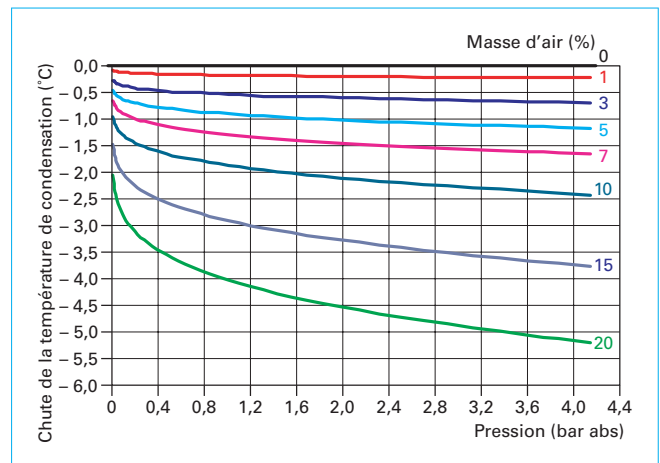


Figure 3 – Diminution de la température de condensation en fonction du pourcentage d'air et de la pression totale

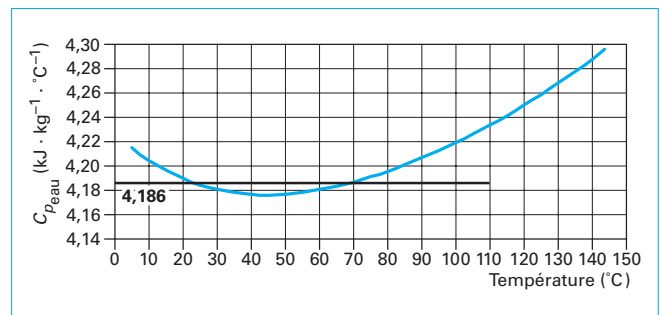


Figure 4 – Variation de la capacité thermique massique de l'eau dans une large plage de température

L'enthalpie de l'eau liquide est donc déterminée à partir de la capacité thermique massique et de la température selon l'équation (3) :

$$(H_{L\text{eau}})_\theta = \int_{0^\circ\text{C}}^{\theta^\circ\text{C}} (C_{pL\text{eau}})_\theta d\theta \quad (3)$$

avec $C_{pL\text{eau}}$ en $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$; θ en $^\circ\text{C}$; $H_{L\text{eau}}$ en kJ/kg .

La capacité thermique massique de l'eau, qui représente par définition la quantité de chaleur nécessaire pour élever un kilogramme d'eau de 1 °C, peut être calculée à partir de l'équation (4) (Component Plus [11]) :

$$(C_{pL\text{eau}})_T = (a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4) f \quad (4)$$

avec $a = 276\,370$; $b = -2\,090,1$; $c = 8,125$; $d = -0,014\,116$;

$e = 9,37 \times 10^{-6}$; $f = 0,05551$;

T en kelvins; $C_{pL\text{eau}}$ en $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

Cette relation est valable entre 0 et 260 °C.

On constate que la variation de la capacité thermique massique est inférieure à 3,3 %, entre 0 et 145 °C (figure 4). Il est donc courant de considérer une capacité thermique massique constante de 4,186 $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ pour l'eau liquide.

L'enthalpie de l'eau liquide bouillante augmente donc avec la pression comme l'augmentation de la température d'ébullition.

Génotelle [15] propose une équation pour le calcul de l'enthalpie de l'eau à sa température d'ébullition en fonction de la température et de la pression (équation (5)) :

$$H_{L\text{eau bouillante}} = 4,186 (0,9984 \times \theta + 0,2425 \times p) \quad (5)$$

avec θ en °C et p en bar abs.

Soit, en tenant compte de l'équation (2) :

$$H_{L\text{eau bouillante}} = 4,186 \left(0,9984 \times \frac{1\,168,4 + 228,42 \ln(p)}{11,727 - \ln(p)} + 0,2425 \times p \right) \quad (6)$$

avec p en bar abs.

1.1.5 Chaleur latente de vaporisation de l'eau et enthalpie de vapeur saturante

La chaleur latente de vaporisation ($\Delta H_{\text{vap eau}}$) représente la quantité d'énergie qu'il faut fournir pour passer une quantité donnée de solvant de l'état liquide à sa température de vapeur saturante à l'état vapeur saturée. La chaleur latente de vaporisation de l'eau peut être déterminée à partir de nombreuses tables disponibles (§ 3) ou, par exemple, à partir de l'équation (7) (*Component Plus* [11]) :

$$\Delta H_{\text{vap eau}} = a \left(1 - \frac{T}{T_c} \right)^{b + c \frac{T}{T_c} + d \left(\frac{T}{T_c} \right)^2} \quad (7)$$

avec T en kelvins (valable de 273 à 647 K (0 à 374 °C)) ;

T_c température du point critique de l'eau (647,13 K) ;

$a = 52\,053\,000$; $b = 0,3199$; $c = -0,212$; $d = 0,25795$.

ou de l'équation (8) [15] :

$$\Delta H_{\text{vap eau}} = 4,186 (600,54 - 0,6093 \times \theta - 0,9576 \times p) \quad (8)$$

avec θ en °C et p en bar abs.

La connaissance des enthalpies de l'eau bouillante ($H_{L\text{eau bouillante}}$) et de la chaleur latente de vaporisation ($\Delta H_{\text{vap eau}}$) à la température de vapeur saturante permet de déterminer l'enthalpie de la vapeur saturante ($H_{V\text{saturée}}$) (équation (9)) :

$$H_{V\text{saturée}} = H_{L\text{eau bouillante}} + \Delta H_{\text{vap eau}} \quad (9)$$

La figure 5, sur laquelle nous avons reporté les enthalpies de l'eau bouillante et de la vapeur saturée en fonction de la pression, illustre bien l'annulation de la chaleur latente de vaporisation au-delà du point critique.

Par contre, dans le domaine de pression 0,1 à 4 bar, plage de pression maximale pour concentrer les produits alimentaires, la chaleur latente de vaporisation de l'eau ($\Delta H_{\text{vap eau}}$) varie peu (figure 6). Elle diminue légèrement avec l'augmentation de pression. Par contre, sa température de condensation augmente.

1.1.6 Volumes spécifiques de l'eau et de la vapeur à la saturation

D'après les tables de données reportées au paragraphe 3, tableaux 4 et 5, le volume spécifique de l'eau liquide varie assez peu avec la pression et donc la température (1,00 L/kg à 4 °C et 1,044 L/kg à 100 °C ; 1,08 L/kg à 140 °C). Par contre, celui de la vapeur saturée augmente énormément quand la pression diminue au-dessous de la pression atmosphérique (figure 7 et § 3). Cette augmentation du volume spécifique de la vapeur avec la baisse de pression doit être prise en compte dans le calcul du diamètre des canalisations, au risque de créer de très grandes vitesses de vapeur, et donc des pertes de charge importantes lors du transfert de la vapeur.

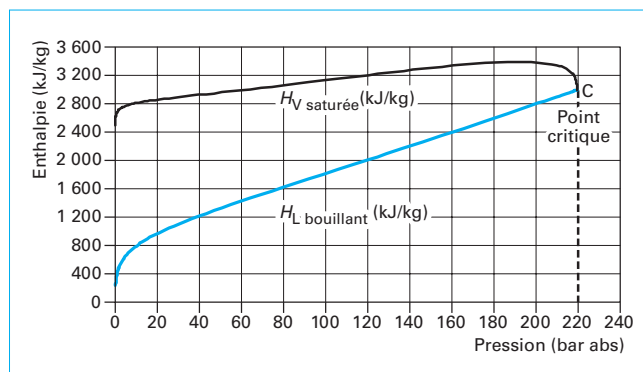


Figure 5 – Variation des enthalpies de l'eau bouillante et de la vapeur d'eau saturée avec la pression

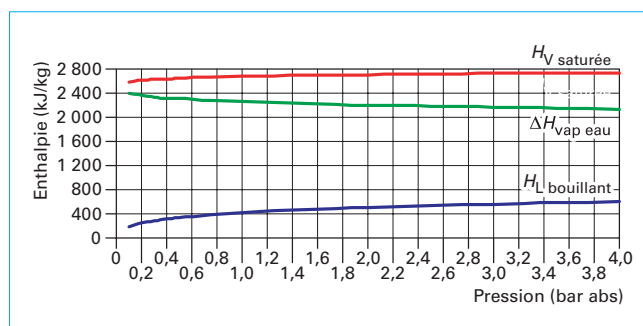


Figure 6 – Variation des enthalpies dans le domaine de pression utilisée pour concentrer les produits alimentaires

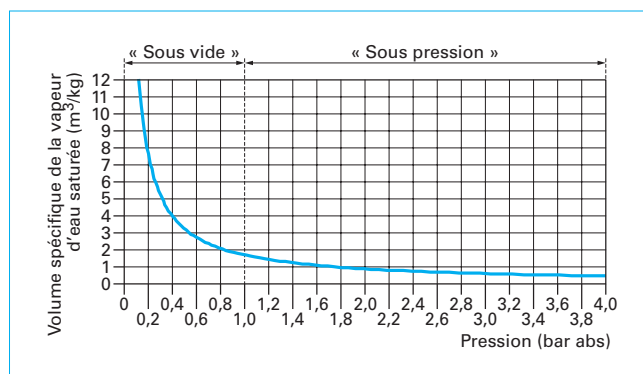


Figure 7 – Variation du volume spécifique de la vapeur d'eau saturée avec la pression

1.1.7 Coefficients isentropique et polytropique de la vapeur d'eau

Lors de la mise en œuvre des économies d'énergie, la vapeur d'eau est détendue ou comprimée. Il est important de rappeler quelques notions de thermodynamique développées plus en détail par Gicquel [16] et Lallemand [18].

Hors zone de condensation, la vapeur d'eau peut être considérée comme un gaz idéal. Par contre, elle ne peut être considérée comme un gaz parfait.

L'équation d'état des gaz idéaux est donnée par (équation (10)) :

$$pV = rT \quad (10)$$

avec r constante d'un gaz idéal définie par R/MM soit, pour la vapeur d'eau, $r_{\text{eau}} = 0,4615 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

L'énergie interne et l'enthalpie d'un gaz idéal ne dépendent que de la température. Les capacités thermiques massiques à pression constante (C_p) et à volume constant (C_v) sont reliées par (équation (11)) :

$$r = C_p - C_v \quad (11)$$

Un gaz parfait est un gaz idéal dont les capacités thermiques massiques C_p et C_v sont constantes et où le coefficient isentropique γ défini par l'équation (12) est constant :

$$\gamma = \left(\frac{C_p}{C_v} \right) \text{ valable pour un gaz parfait} \quad (12)$$

Le coefficient isentropique γ est égal à 5/3 pour les gaz monoatomiques, 7/5 pour les gaz diatomiques, 9/7 pour les gaz triatomiques, etc.

Pour les gaz qui ne sont pas parfaits, tels que la vapeur d'eau hors zone de condensation, on définit un coefficient polytropique (équation (13)) noté κ qui dépend de la température :

$$\kappa = \left(\frac{C_p}{C_v} \right) \text{ valable pour un gaz idéal} \quad (13)$$

Pour le calcul de la capacité thermique massique de la vapeur d'eau hors zone de condensation, Gicquel [16] propose l'équation (14) :

$$C_{p_{\text{vapeur à saturation}}} = \frac{83,15 - \frac{1863}{\sqrt{T}} + \frac{17445}{T}}{18,0} \quad (14)$$

(valable entre 300 et 3 000 K).

Pour la vapeur d'eau, en utilisant les équations (11), (13) et (14), le coefficient κ varie de 1,33 à 1,32 respectivement pour 25 °C et 200 °C.

1.1.8 Enthalpie de la vapeur surchauffée

La vapeur d'eau peut être à une température supérieure à sa température de condensation. On dit alors qu'elle est « surchauffée ». L'enthalpie de la vapeur surchauffée peut être déterminée graphiquement à l'aide du diagramme de Mollier (cf. § 3 figure 19) ou par calcul en considérant la capacité thermique massique de la vapeur et l'écart entre la température de la vapeur et sa température de condensation (équation (15)) pour la pression considérée :

$$H_{V_{\text{surchauffée}}} = H_{V_{\text{saturée}}} + \int_{\theta_{\text{sat}}}^{\theta} C_{p_{\text{vapeur}}} d\theta \quad (15)$$

avec $C_{p_{\text{vapeur}}}$ en $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$; θ en °C ; H en $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Gicquel [16] souligne que, au voisinage de la zone de condensation, la vapeur d'eau s'éloigne des conditions de gaz idéal et l'équation (11) n'est plus applicable. La capacité thermique massique ne peut donc plus être estimée avec l'équation (14) et il recommande l'emploi de tables.

Génotelle [15] propose une relation permettant de déterminer la capacité thermique massique de la vapeur surchauffée en fonction

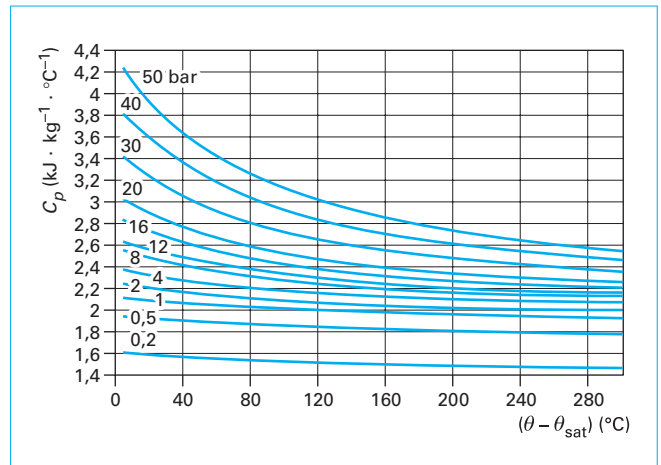


Figure 8 - Variation de la capacité thermique massique de la vapeur en fonction de la pression et de la surchauffe (d'après [15])

de l'écart de température par rapport à la température de vapeur saturante (équation (16)) :

$$C_{p_{\text{vapeur}}} = 4,186 \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{12,2p}} \right) \left(0,485 + (p+6) \frac{0,88}{(\theta - \theta_{\text{sat}}) + 90} \right) \quad (16)$$

avec θ en °C et p en bar abs.

La figure 8 illustre la variation de la capacité thermique massique de la vapeur surchauffée avec la température : elle augmente avec la pression mais diminue avec l'augmentation de la température de surchauffe. Ainsi, entre 0,5 bar et 4 bar abs, et pour une amplitude de surchauffe de 70 °C, la capacité thermique massique varie de 1,93 $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ à 2,3 $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$. Dans les bilans, on peut donc considérer, sans trop introduire d'erreur, que la capacité thermique massique de la vapeur d'eau surchauffée est constante avec une valeur autour de 2,1 $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$.

Comme il sera précisé plus loin, il est préférable d'éviter d'introduire dans les évaporateurs de la vapeur surchauffée.

1.1.9 Désurchauffe de la vapeur surchauffée

La désurchauffe d'une vapeur consiste à ramener la vapeur à son état de vapeur saturée. Elle est effectuée, à pression constante, en pulvérisant de l'eau qui se vaporise grâce à l'enthalpie de surchauffe. Le flux d'eau nécessaire dépend directement des enthalpies de l'eau de désurchauffe (H_{ed}), de la vapeur surchauffée ($H_{V_{\text{surchauffée}}}$) et de la vapeur saturée ($H_{V_{\text{saturée}}}$) à la même pression (équation (17)) :

$$\dot{m}_{\text{ed}} = \dot{m}_{V_{\text{surchauffée}}} \left(\frac{H_{V_{\text{surchauffée}}} - H_{V_{\text{saturée}}}}{H_{V_{\text{saturée}}} - H_{\text{ed}}} \right) \quad (17)$$

1.2 Influence des matières sèches dissoutes sur l'ébullition des solutions

La plupart des solutions concernées par l'opération de concentration en industrie alimentaire sont des solutions aqueuses. La présence des matières sèches dissoutes influe sur plusieurs caractéristiques des solutions. Cela doit être pris en compte dans le fonctionnement des évaporateurs.

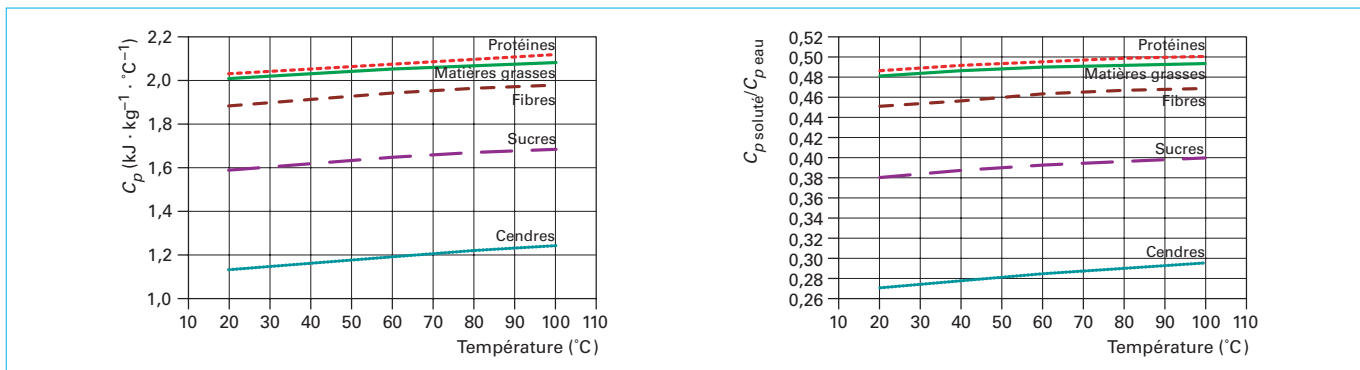


Figure 9 – Évolution du C_p des solutés et du rapport de leur C_p avec l'eau en fonction de la température (données issues de [10])

Tableau 1 – Coefficients pour calcul de C_p ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$) de Choi et Okos [10]			
Coefficient	a	b	c
Protéines	$2\,008,2 \times 10^{-3}$	$1\,208,9 \times 10^{-6}$	$-1\,312,9 \times 10^{-9}$
Matières grasses	$1\,984,2 \times 10^{-3}$	$1\,473,3 \times 10^{-6}$	$-4\,800,8 \times 10^{-9}$
Sucres	$1\,548,8 \times 10^{-3}$	$1\,962,5 \times 10^{-6}$	$-5\,939,9 \times 10^{-9}$
Fibres	$1\,845,9 \times 10^{-3}$	$1\,830,6 \times 10^{-6}$	$-4\,650,9 \times 10^{-9}$
Cendres	$1\,092,6 \times 10^{-3}$	$1\,889,6 \times 10^{-6}$	$-3\,681,7 \times 10^{-9}$

1.2.1 Influence des solutés sur la capacité thermique massique des solutions

La capacité thermique massique des solutions dépend de leur composition. Chaque type de soluté intervient dans le calcul de la capacité thermique massique moyenne. On peut ainsi écrire (équation (18)) :

$$C_{pL} = \sum_{i=1}^n x_i C_{p_i} \tag{18}$$

avec x_i fraction massique du composé i (kg de i /kg solution),
 C_{p_i} capacité thermique massique de i ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$).

Choi et Okos [10] ont déterminé les propriétés des principaux composés alimentaires. Comme pour l'eau, la capacité thermique massique varie légèrement avec la température. Ils ont proposé une équation polynomiale d'ordre 2 (équation (19)) avec les coefficients indiqués dans le tableau 1 :

$$(C_{p_i})_{\theta} = a_i + b_i \theta + c_i \theta^2 \tag{19}$$

Les solutés ont des capacités thermiques massiques inférieures à celle de l'eau (figure 9).

Plutôt que de considérer la valeur absolue de C_p pour chaque type de soluté, on peut considérer leur valeur par rapport à l'eau et prendre, par exemple, la valeur moyenne calculée sur la plage 20 à 100 °C (équations (20)) :

$$\begin{aligned} C_{p_{\text{protéines}}} &= 0,495 C_{p_{\text{eau}}} \\ C_{p_{\text{matières grasses}}} &= 0,489 C_{p_{\text{eau}}} \\ C_{p_{\text{fibres}}} &= 0,461 C_{p_{\text{eau}}} \\ C_{p_{\text{sucres}}} &= 0,391 C_{p_{\text{eau}}} \\ C_{p_{\text{cendres}}} &= 0,284 C_{p_{\text{eau}}} \end{aligned} \tag{20}$$

et écrire (équation (21)) :

$$C_{pL} = (x_{\text{eau}} + 0,495 x_{\text{protéines}} + 0,489 x_{\text{matières grasses}} + 0,461 x_{\text{fibres}} + 0,391 x_{\text{sucres}} + 0,284 x_{\text{cendres}}) C_{p_{\text{eau}}} \tag{21}$$

On ne connaît généralement pas la composition exacte des solutions et, compte tenu de la faible importance des enthalpies des liquides devant les enthalpies de vapeur, on peut considérer que les solutés alimentaires ont une capacité thermique massique égale à 0,44 fois celle de l'eau, d'où (équation (22)) :

$$C_{pL} = (x_{\text{eau}} + 0,44 x_L) C_{p_{\text{eau}}} = (1 - 0,56 x_L) C_{p_{\text{eau}}} \tag{22}$$

puisque $x_{\text{eau}} = (1 - x_L)$

1.2.2 Influence des solutés sur la température d'ébullition des solutions

La présence des matières sèches dissoutes a également une influence sur la température d'ébullition de la solution. En effet, comme nous l'avons indiqué plus haut, une solution atteint sa température d'ébullition quand la pression de vapeur exercée par celle-ci est égale à la pression totale dans l'enceinte. Or, la présence des matières sèches dissoutes diminue l'activité de l'eau (a_w) et, par là même, la pression de vapeur exercée par la solution (p_{eau}) en comparaison de celle qu'aurait exercé de l'eau pure ($p_{\text{eau}}^{\text{sat}}$) (équation (23)) :

$$p_{\text{eau}} = X_{\text{eau}} \gamma_{\text{eau}} p_{\text{eau}}^{\text{sat}} = a_w p_{\text{eau}}^{\text{sat}} \tag{23}$$

avec p_{eau} pression partielle de vapeur d'eau exercée par la solution (Pa) ,

X_{eau} fraction molaire d'eau,

γ_{eau} coefficient d'activité de l'eau,

$p_{\text{eau}}^{\text{sat}}$ pression de vapeur saturante de l'eau à la même température (Pa) ,

a_w activité de l'eau du liquide.

Il s'ensuit que la température d'ébullition du liquide (θ_L^{eb}) contenant des solutés est supérieure à celle de l'eau. La différence entre les deux correspond à l'**élévation ébullioscopique** (EE_L) (équation (24)) :

$$EE_L = \theta_L^{\text{eb}} - (\theta_{\text{eau}}^{\text{eb}})_{\text{même pression}} \tag{24}$$

Pour déterminer EE_L , on peut s'appuyer sur l'équation de Clapeyron (équation 25) :

$$\ln(a_w) = \frac{\Delta H_{\text{vap eau molaire}}}{R} \left(\frac{1}{T_L} - \frac{1}{T_{\text{eau}}} \right) = \frac{\Delta H_{\text{vap eau}} MM_{\text{eau}}}{R} \left(\frac{T_{\text{eau}} - T_L}{T_{\text{eau}} T_L} \right) \quad (25)$$

$$\approx \frac{\Delta H_{\text{vap eau}} MM_{\text{eau}}}{RT_{\text{eau}}^2} (-EE_L)$$

avec $\Delta H_{\text{vap eau}}$ chaleur latente massique de vaporisation de l'eau ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$),

MM_{eau} masse molaire de l'eau ($18,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$),

R constante molaire des gaz ($8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),

T_L température d'ébullition de la solution (K),

T_{eau} température d'ébullition de l'eau à la même pression (K),

EE_L élévation ébullioscopique de la solution (K ou °C).

Or, lorsque la solution est suffisamment diluée ($X_{\text{eau}} \geq 0,92 \Leftrightarrow X_L \leq 0,08$) et que le soluté n'exerce aucune pression de vapeur, le coefficient d'activité de l'eau (γ_{eau}) tend vers 1 car il y a peu de phénomènes d'interactions. L'équation (25) se simplifie et on obtient l'équation (26) :

$$p_{\text{eau}} = X_{\text{eau}} p_{\text{eau}}^{\text{sat}} = (1 - X_L) p_{\text{eau}}^{\text{sat}} = a_w p_{\text{eau}}^{\text{sat}}$$

$$\Rightarrow a_w = 1 - X_L \quad (26)$$

$$\Rightarrow \ln(a_w) = \ln(1 - X_L) \approx -X_L$$

avec X_{eau} fraction molaire d'eau,

X_L fraction molaire de soluté.

En combinant les équations (25) et (26), il vient (équation (27)) :

$$-X_L = - \frac{\Delta H_{\text{vap eau}} MM_{\text{eau}}}{RT_{\text{eau}}^2} EE_L \quad (27)$$

$$\Rightarrow EE_L = \frac{RT_{\text{eau}}^2}{\Delta H_{\text{vap eau}} MM_{\text{eau}}} X_L$$

Pour une pression proche de la pression atmosphérique, il vient (équation (28)) :

$$EE_L = \frac{8,314 \times (373)^2}{2 \times 250 \times 18} X_L = 28,3 X_L \quad (28)$$

Comme l'illustre la figure 10, le coefficient $\frac{RT_{\text{eau}}^2}{\Delta H_{\text{vap eau}} MM_{\text{eau}}}$, qui

est de 28,3 à la pression atmosphérique, varie avec la pression. On peut également représenter ce coefficient en fonction de la température d'ébullition de l'eau.

Ainsi, plus la masse molaire du soluté est faible, plus l'élévation ébullioscopique est importante pour une même fraction massique en soluté (tableau 2).

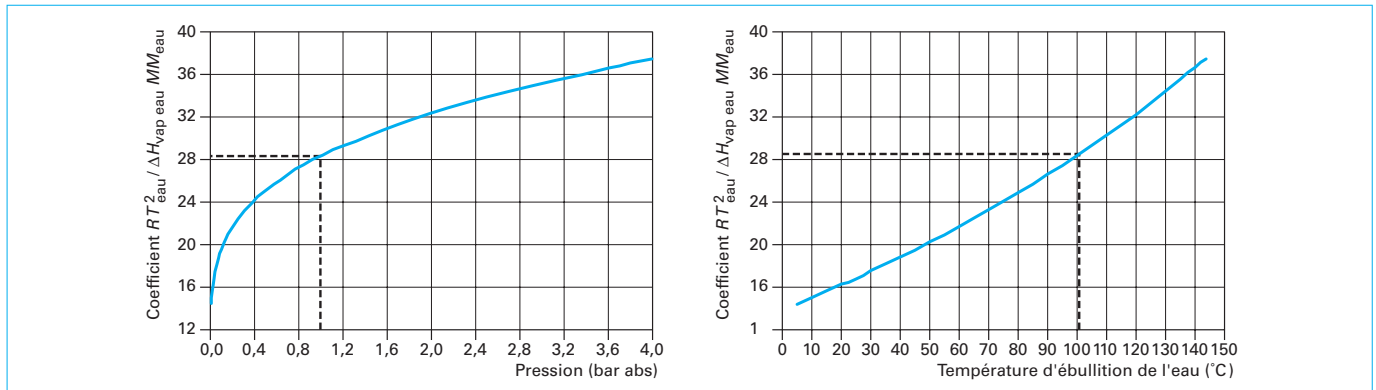


Figure 10 – Coefficient $\left(\frac{RT_{\text{eau}}^2}{\Delta H_{\text{vap eau}} MM_{\text{eau}}} \right)$ en fonction de la pression ou de la température d'ébullition de l'eau

Tableau 2 – Variation de l'élévation ébullioscopique EE en fonction du soluté

Soluté	MM (kg/mol)	MS (%)	Fraction molaire	EE à 80 °C (°C)	EE à 100 °C (°C)
Raffinose (triholoside)	0,488	50	0,0356	0,9	1,0
Saccharose, lactose	0,342	50	0,05	1,3	1,4
Saccharose	0,342	70	0,109 > 0,08	Calcul = 2,7 Exp = 4,3 (1)	Calcul = 3,1 Exp = 5,0 (1)
Glucose, fructose, galactose	0,180	50	0,091 (limite)	2,3	2,6
Soude	0,040	9,1	0,043	Calcul = 1,1 Exp = 2,2 (2)	Calcul = 1,2 Exp = 2,2 (2)

(1) Expérimentales d'après Bubnick *et al.* [8].
 (2) Expérimentales d'après Perry et Green [24].

Dans le cas de solutions ne pouvant plus être considérées comme diluées ($X_L > 0,08$) ou dont les solutés exercent une pression de vapeur significative, il est nécessaire de déterminer ces valeurs expérimentalement. À titre d'illustration sont reportées sur le tableau 2, les valeurs pour une solution pure de saccharose à 70 % de matières sèches. L'utilisation de l'équation établie pour les solutions diluées entraînerait une erreur de plus de 1,5 °C, ce qui n'est pas négligeable. Attention, pour certaines solutions même diluées, par exemple la soude à 9%MS, les données issues de la littérature [24] sont supérieures à celles estimées par calcul en considérant une solution très diluée. Il convient donc d'être prudent dans l'estimation des élévations ébullioscopiques et de ne pas hésiter à recourir à quelques mesures expérimentales.

2. Évaporateur simple effet et auxiliaires

2.1 Circuits d'un évaporateur simple effet et auxiliaires

On peut représenter de manière schématique les fonctions d'un évaporateur (figure 11).

2.1.1 Circuit de la vapeur de chauffage

La vapeur de chauffage est introduite dans la partie « chauffe » de l'évaporateur (ici un évaporateur à grimpage). Sa pression ou son débit sont réglés grâce à un détendeur (vanne régulant la pression aval). La vapeur issue de la chaudière étant généralement surchauffée, il est préférable de la désurchauffer (cf. § 1.1.9 et § 2.3.1) avant son introduction dans l'évaporateur.

Du fait de l'écart de température entre la partie vapeur de chauffage et la partie liquide à concentrer, un transfert de chaleur s'opère vers le produit et la vapeur de chauffage se condense. Les condensats sont évacués *via* des purgeurs ou par une pompe. Les purgeurs ou les pompes doivent être connectés dans la partie basse de la zone de chauffe. Il est important que l'évacuation se fasse

correctement, sous peine d'une réduction de la surface disponible au transfert de chaleur. Les condensats, s'ils sont générés par une vapeur issue de la chaudière, peuvent être recyclés vers la chaudière.

Il est important d'éviter toute accumulation de gaz incondensables engendrant une baisse de coefficient de transfert de chaleur (cf. § 2.3) mais également, comme souligné plus haut, une baisse de la température de condensation et, par là même, une baisse de l'écart de température utile au transfert de chaleur. Pour éviter cela, une ou plusieurs extractions de vapeur sont installées dans les zones « mortes » où les gaz auraient tendance à s'accumuler. La vapeur entraînée par cette purge, dite « vapeur de balayage », est aspirée par le condenseur ou, éventuellement, dirigée vers des échangeurs de récupération. Dans ce cas, la vapeur de balayage n'est pas totalement une perte.

2.1.2 Circuits du liquide à concentrer et de la vapeur émise

Afin que l'évaporateur soit utilisé dans les meilleures conditions de transfert de chaleur (cf. § 2.3), le liquide à concentrer est le plus souvent introduit à une température proche de sa température d'ébullition. La circulation du liquide dépend de la technologie de l'évaporateur mise en œuvre (cf. [F 3 004] § 1). Dans les évaporateurs avec ébullition au niveau de la surface d'échange, la température d'ébullition du liquide est fixée par la pression et par l'élévation ébullioscopique.

La vapeur émise par le produit, parfois nommée « buée », est aspirée vers un autre échangeur pour être condensée. Lorsque le flux de vapeur émis est important, cela peut conduire à l'entraînement de gouttelettes de liquide dans la vapeur, phénomène connu sous le nom de « primage ». Afin de capter ces fines gouttelettes, la zone de séparation de la vapeur et du liquide est généralement de fort diamètre (faible vitesse ascensionnelle de la vapeur) et un séparateur additionnel (tamis métallique, système centrifuge) est installé sur le trajet de la vapeur.

Malgré ces éléments, la vapeur émise n'est pas de l'eau pure car elle entraîne avec elle des composés volatils qui se sont vaporisés. Les condensats formés à partir de cette vapeur peuvent donc être trop chargés en DCO (demande chimique en oxygène) pour être évacués tels quels ; ils sont alors dirigés vers un système de traitement.

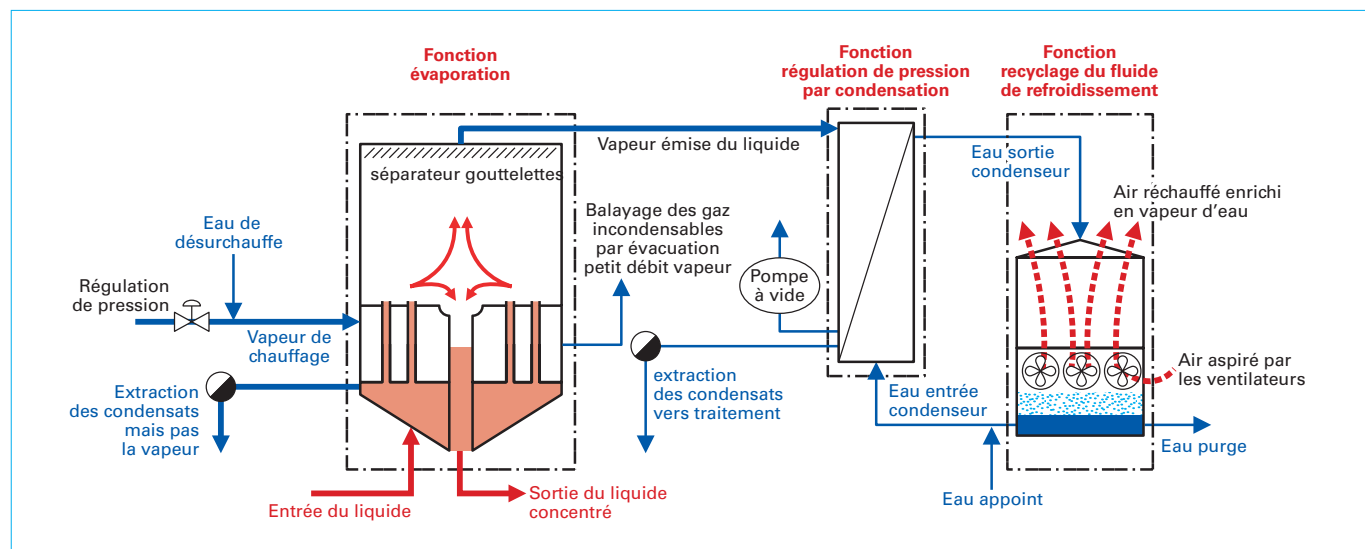


Figure 11 – Schématisation des circuits d'un évaporateur simple

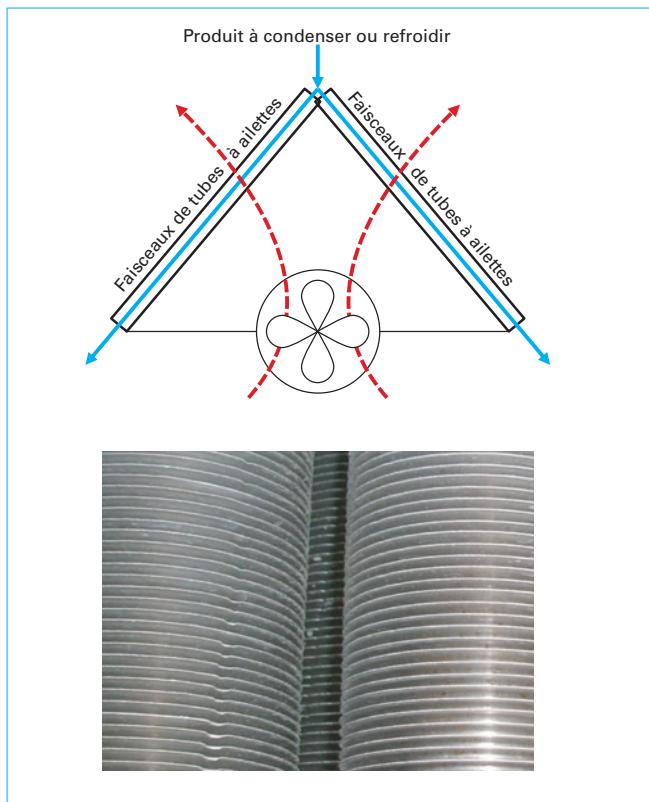


Figure 12 – Schéma de principe d'un aérocondenseur et photographie des tubes à ailettes

Ajoutons que, dans certains cas, le liquide a tendance à mousser. Il est alors nécessaire d'injecter des antimousses sous peine que la mousse envahisse tout le circuit de vapeur émise, avec des entraînements de produits importants.

2.1.3 Circuit de condensation de la vapeur émise et obtention du vide

La vapeur émise par le produit est aspirée vers un système de condensation. Dans la plupart des installations, comme illustré sur la figure 11, la dernière vapeur émise est aspirée par un échangeur tubulaire ou à plaques dans lequel circule le fluide de refroidissement, le plus souvent de l'eau froide. Mais, pour éviter les problèmes induits par le circuit de refroidissement de l'eau (cf. § 2.1.4), il est possible d'utiliser un condenseur où le fluide de condensation est l'air. On parle alors « d'aérocondenseur ». Il se compose généralement d'un faisceau de tubes à ailettes traversé par un courant d'air pulsé (figure 12). La vapeur à condenser est distribuée à l'entrée des tubes échangeurs par des boîtes collectrices.

Demeurent également, dans quelques cas particuliers, des condenseurs dits « à mélange » où l'eau de refroidissement est mélangée à la vapeur à condenser. La sortie de l'eau du condenseur à mélange peut se faire par colonne barométrique (figure 13) ou par pompe. Le principal inconvénient de ce type de condenseur est que la vapeur à condenser, qui n'est pas forcément exempte de matières organiques, est directement mise en contact avec l'eau de condensation. Or, l'eau tiède issue du mélange doit être refroidie (cf. § 2.1.4) afin d'être à nouveau utilisée comme fluide de condensation. L'eau servant à la condensation se charge donc en matières organiques, ce qui peut poser des problèmes d'environnement. Elle peut également être le siège de développements de

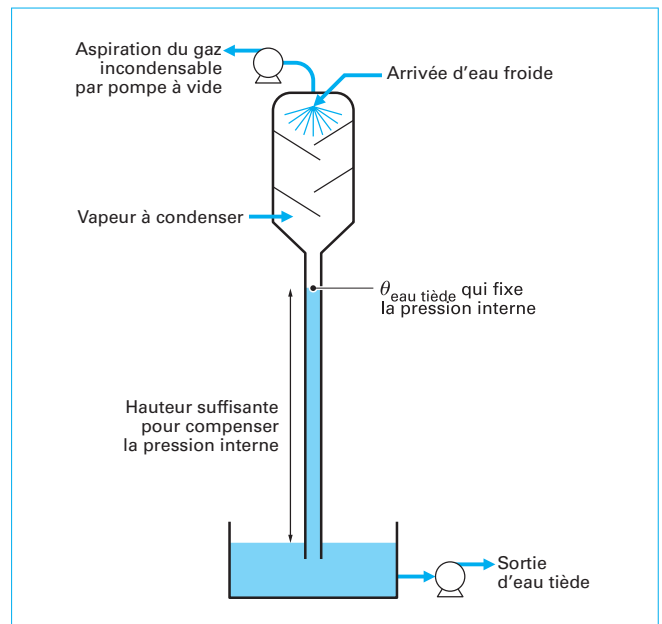


Figure 13 – Schéma de principe d'un condenseur barométrique

micro-organismes. Ces condenseurs ne sont donc pas recommandés dans les applications agroalimentaires.

La plupart des évaporateurs concentrant les liquides alimentaires fonctionnent « sous vide » pour obtenir l'ébullition du produit à une température suffisamment basse pour limiter leur dégradation. Le circuit de condensation de la vapeur est donc relié à une pompe à vide chargée d'évacuer les gaz incondensables. Le rôle de la pompe à vide est crucial car il faut absolument évacuer les gaz incondensables (air, ammoniac, CO₂, etc.). Par contre, il faut bien se rappeler que l'essentiel du vide vient de la condensation de la vapeur émise.

2.1.4 Circuit de refroidissement de l'eau de condensation

Le bon fonctionnement du circuit de refroidissement de l'eau utilisée pour condenser la vapeur est également crucial. Ce point est souvent négligé. Or, si l'installation ne permet pas d'éliminer de manière satisfaisante la chaleur, il n'est plus possible d'assurer le vide et donc la capacité de production.

Les lois environnementales en vigueur en Europe n'autorisent pas, sauf arrêté préfectoral particulier, une usine à prélever de l'eau froide d'une rivière et à la rejeter sous forme d'eau chaude. Il est donc nécessaire de fonctionner en circuit fermé avec réutilisation de l'eau après refroidissement dans un appareil appelé réfrigérant [19] ou aérorefrigérant si le fluide de refroidissement est l'air. Parmi ceux-ci, on distingue deux systèmes principaux.

■ Les aérorefrigérants humides sans parois offrent un contact direct, aussi intime que possible, entre les deux fluides (l'eau à refroidir et l'air). Peuvent se classer dans cette catégorie les aérorefrigérants atmosphériques à tirage naturel et les aérorefrigérants atmosphériques à circulation d'air forcée par ventilateurs, qui constituent la majorité des appareils industriels ainsi que les aérorefrigérants monoblocs. La température régnant dans ces appareils est favorable au développement de micro-organismes, notamment la *légionella pneumophila* qui est une bactérie dangereuse. La contamination se faisant par inhalation d'aérosols, il est nécessaire de limiter l'entraînement des gouttelettes et d'assurer

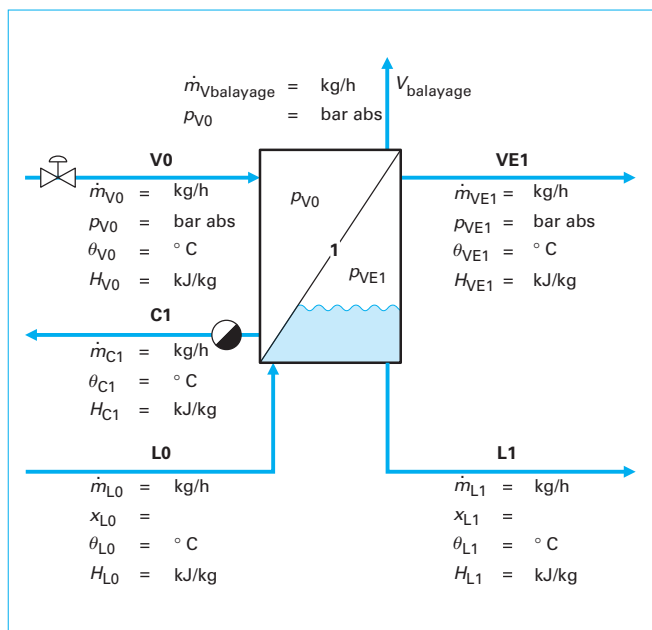


Figure 14 – Schématisation de l'évaporateur pour l'écriture des bilans

un traitement régulier de l'eau [7]. De part ce risque de contamination, de plus en plus d'entreprises choisissent des aéro-réfrigérants secs où l'air de refroidissement n'est plus en contact avec l'eau à refroidir.

■ Les aéro-réfrigérants secs sont des refroidisseurs à parois où il n'y a pas de contact physique entre le fluide à refroidir et le fluide refroidisseur. Dans cette catégorie entrent les échangeurs, les aéro-réfrigérants (entre fluide et air) et les aérocondenseurs (entre vapeur et air) (figure 12). Le fonctionnement de ces appareils est décrit par Manas [21]. On notera toutefois, dans ce cas, que la température de refroidissement ne peut pas être inférieure à la température ambiante, ce qui limite ce type d'aéro-réfrigérant à des applications dont la température d'ébullition n'est guère inférieure à 55-60 °C.

2.2 Écriture des bilans

2.2.1 Bilans sur l'évaporateur

Pour simplifier l'écriture des bilans, on peut considérer un évaporateur simple d'indice 1 recevant un liquide L0 et une vapeur V0 et d'où sortent un liquide concentré L1, des condensats C1, de la vapeur émise VE1 et de la vapeur de balayage. On peut prendre une notation simplifiée comme indiqué sur la figure 14.

En régime permanent, plusieurs bilans peuvent être écrits :

– bilans matières côté vapeur et liquide (équation (29)) :

$$\dot{m}_{V0} = \dot{m}_{C1} + \dot{m}_{V_{balayage}} \text{ et } \dot{m}_{L0} = \dot{m}_{L1} + \dot{m}_{VE1} \quad (29)$$

– bilan de matières sèches (équation (30)) :

$$\dot{m}_{L0} x_{L0} = \dot{m}_{L1} x_{L1} \quad (30)$$

– bilan enthalpique (équation (31)) :

$$\dot{m}_{V0} H_{V0} + \dot{m}_{L0} H_{L0} = \dot{m}_{C1} H_{C1} + \dot{m}_{L1} H_{L1} + \dot{m}_{VE1} H_{VE1} + \dot{m}_{V_{balayage}} H_{V0} + \dot{q}_{perdes} \quad (31)$$

$$\dot{Q}_1 = (\dot{m}_{V0} - \dot{m}_{V_{balayage}}) (H_{V0} - H_{C1}) - \dot{q}_{perdes} = -\dot{m}_{L0} H_{L0} + \dot{m}_{L1} H_{L1} + \dot{m}_{VE1} H_{VE1}$$

Les données enthalpiques se déterminent aisément à partir des données citées précédemment pour l'eau, la vapeur et les solutions.

En faisant l'hypothèse que la vapeur admise (V0) est une vapeur saturée et que les condensats (C1) sont évacués à leur température de condensation, la vapeur cède sa chaleur latente de vaporisation ΔH_{V0} et il vient (équation (32)) :

$$\dot{Q}_1 = (\dot{m}_{V0} - \dot{m}_{V_{balayage}}) \Delta H_{V0} - \dot{q}_{perdes} \approx -\dot{m}_{L0} (H_{L0} - H_{L1}) + \dot{m}_{VE1} \Delta H_{VE1} \quad (32)$$

De même, si le liquide L0 est introduit à une température proche de sa température d'ébullition dans la calandre, $H_{L0} \approx H_{L1}$ et il vient (équation (33)) :

$$\dot{Q}_1 = (\dot{m}_{V0} - \dot{m}_{V_{balayage}}) \Delta H_{V0} - \dot{q}_{perdes} \approx \dot{m}_{VE1} \Delta H_{VE1} \quad (33)$$

C'est ainsi que, en négligeant le flux de vapeur de balayage et les pertes de chaleur, et en considérant que les chaleurs latentes de vaporisation côté chauffage et côté liquide sont proches, il est fréquent de dire :

« 1 kg de vapeur qui se condense permet d'évaporer 1 kg d'eau d'un liquide bouillant »

– Enfin, il ne faut pas oublier le bilan du flux de chaleur qui ne peut pas être dissocié des précédents. En un point de l'échangeur (équation (34)) :

$$d\dot{Q} = (h_G)_{local} dA \Delta \theta \quad (34)$$

avec $d\dot{Q}$ flux de chaleur échangée par la surface dA pour l'évaporateur (W),

$(h_G)_{local}$ coefficient local de transfert global de chaleur pour la surface dA ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$),

dA élément de surface d'échange de l'évaporateur (m^2),

$\Delta \theta$ écart de température local au niveau de la surface dA ($^\circ C$).

Pour les évaporateurs où le liquide bout au niveau de la surface d'échange, il est d'usage de considérer que les températures de condensation de la vapeur (θ_{V0}^{sat}) et d'ébullition du liquide (θ_{L1}^{eb}) sont constantes et que le transfert moyen pour l'évaporateur d'indice 1 est (équation (35)) :

$$\dot{Q}_1 = (h_G)_1 A_1 (\theta_{V0}^{sat} - \theta_{L1}^{eb}) \quad (35)$$

avec \dot{Q}_1 flux de chaleur échangée pour l'évaporateur d'indice 1 (W),

$(h_G)_1$ coefficient de transfert global de chaleur de l'évaporateur 1 ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$),

A_1 surface d'échange de l'évaporateur 1 (m^2),

$(\theta_{V0}^{sat} - \theta_{L1}^{eb})$ écart de température utile au transfert de l'évaporateur 1 ($^\circ C$).

Les équations de transfert de chaleur dans le cas des évaporateurs à grimpage et des évaporateurs sans ébullition dans la zone d'échange seront présentées dans l'article suivant [F 3 004].

Il est d'usage de repérer l'écart de température pris en compte dans l'équation de transfert de chaleur par « $\Delta\theta_{\text{utile}}$, écart utile de température » au contraire des diminutions de température de condensation du fait de la perte de charge ou de l'élévation ébullioscopique qui ne sont pas considérées comme utiles.

Le point le plus important à considérer ici concerne l'estimation du coefficient de transfert global (h_G)₁. Ce point est traité en détail au paragraphe 2.3.

2.2.2 Bilans sur le condenseur

Rappelons que le rôle du condenseur (ou de tout autre échangeur aspirant la vapeur émise du produit) est de condenser la vapeur émise VE1 afin de maintenir la pression p_{VE1} . La figure 15 présente des schémas simplifiés de condenseurs.

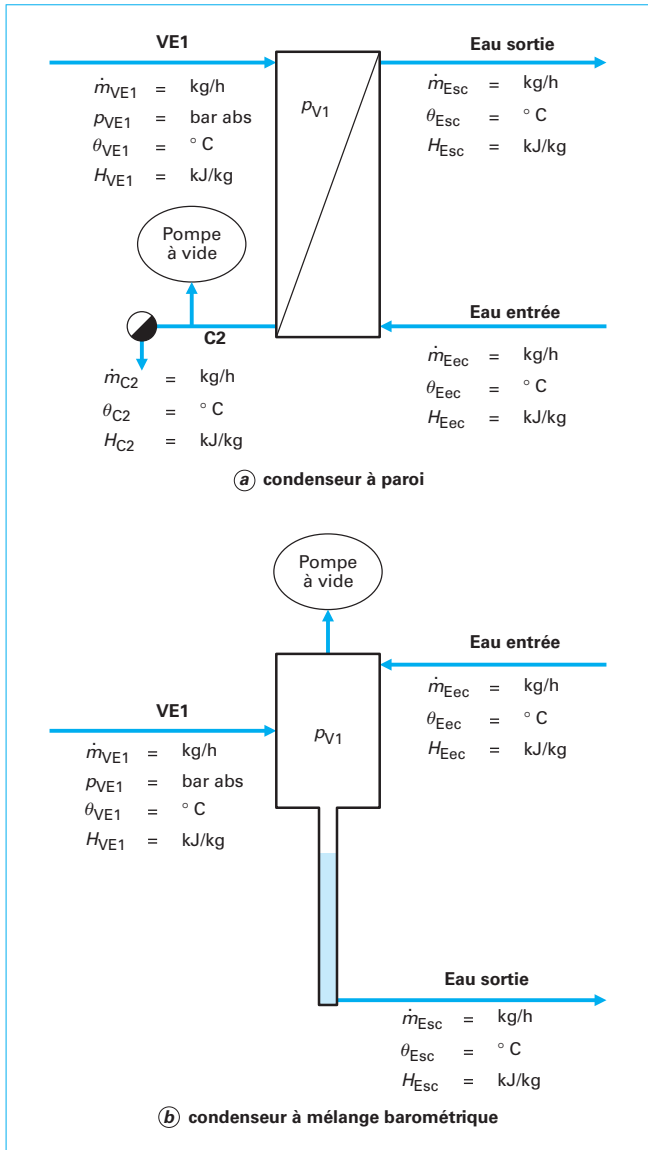


Figure 15 – Schématisation des condenseurs pour l'écriture des bilans

■ Dans le cas d'un condenseur à paroi (figure 15a), le plus utilisé, le paramètre important à fixer est la température de sortie de l'eau. Celle-ci dépend de la température de condensation de la vapeur VE1. On prend le plus souvent un pincement de 10 °C, soit (équation (36)) :

$$\theta_{Esc} = \theta_{VE1}^{sat} - \Delta\theta_{\text{pincement}} = \theta_{VE1}^{sat} - 10 \quad (36)$$

De là, il est possible de déduire le débit d'eau en entrée (équation (37)) :

$$\dot{m}_{Eec} = \frac{\dot{Q}_{\text{condenseur}}}{H_{Esc} - H_{Eec}} \approx \frac{\dot{m}_{VE1} \Delta H_{VE1}}{H_{Esc} - H_{Eec}} \quad (37)$$

La surface du condenseur à prévoir dépend du coefficient de transfert moyen du condenseur ($h_{\text{condenseur}}$) et de la moyenne logarithmique des écarts de température entre la vapeur en condensation et l'eau (équation (38)) :

$$A_{\text{condenseur}} = \frac{\dot{Q}_{\text{condenseur}}}{h_{\text{condenseur}} \Delta\theta_{\text{utile}}}$$

avec :

$$\Delta\theta_{\text{utile}} = \frac{(\theta_{VE1}^{sat} - \theta_{Eec}) - (\theta_{VE1}^{sat} - \theta_{Esc})}{\ln\left(\frac{\theta_{VE1}^{sat} - \theta_{Eec}}{\theta_{VE1}^{sat} - \theta_{Esc}}\right)} = \frac{(\theta_{Esc} - \theta_{Eec})}{\ln\left(\frac{\theta_{VE1}^{sat} - \theta_{Eec}}{\theta_{VE1}^{sat} - \theta_{Esc}}\right)} \quad (38)$$

■ Dans le cas d'un condenseur à mélange barométrique (figure 15b), on prend généralement un écart de température plus faible par rapport à la température de vapeur à aspirer que pour un condenseur à paroi. La température de sortie de l'eau est, compte tenu de la perte de charge, de la qualité de la pulvérisation de l'eau et de la présence des gaz incondensables, d'environ 5 °C au-dessous de la température de vapeur saturante à aspirer.

La vapeur se mélangeant à l'eau, le débit d'eau à l'entrée est donné par (équation (39)) :

$$\dot{m}_{Eec} = \dot{m}_{VE1} \frac{H_{VE1} - H_{Esc}}{H_{Esc} - H_{Eec}} \quad (39)$$

2.2.3 Bilan sur l'aéroréfrigérant humide

Le principe de l'aéroréfrigérant humide est d'assurer un contact à contre-courant entre l'eau à refroidir, distribuée à la partie supérieure de l'appareil, et de l'air. La circulation de l'air est le plus souvent assurée par des ventilateurs placés soit sur le côté (figure 16a), soit sur la partie supérieure. L'air au contact de l'eau à refroidir se réchauffe, ce qui augmente la quantité de vapeur d'eau qui peut être contenue par cet air à la saturation (figure 16b). L'eau qui s'est évaporée dans l'air a puisé sa chaleur de l'eau elle-même. Ainsi, le refroidissement de l'eau est la résultante de 2 phénomènes : le réchauffement de l'air (pour environ 10 %) et, surtout, l'évaporation d'eau dans l'air (pour environ 90 %). Dans le cas des aéroréfrigérants humides, l'eau en sortie a une température très voisine de celle du bulbe humide et donc peut être inférieure à la température ambiante. Cela permet d'atteindre des niveaux de vide plus profonds, correspondant à des températures de condensation de la vapeur VE1 plus basses (typiquement 45 °C pour une température de bulbe humide de 25 °C).

L'air à la sortie du réfrigérant atmosphérique débouche dans une atmosphère dont la température est beaucoup plus basse. À cette température, la concentration en vapeur d'eau peut être supérieure à la saturation et la vapeur en excès se condense et forme un brouillard. Ce dernier se manifeste par un « panache » au-dessus du réfrigérant. L'air se dilue dans l'atmosphère, l'eau formée se vaporise à nouveau et le panache disparaît. Ainsi, la

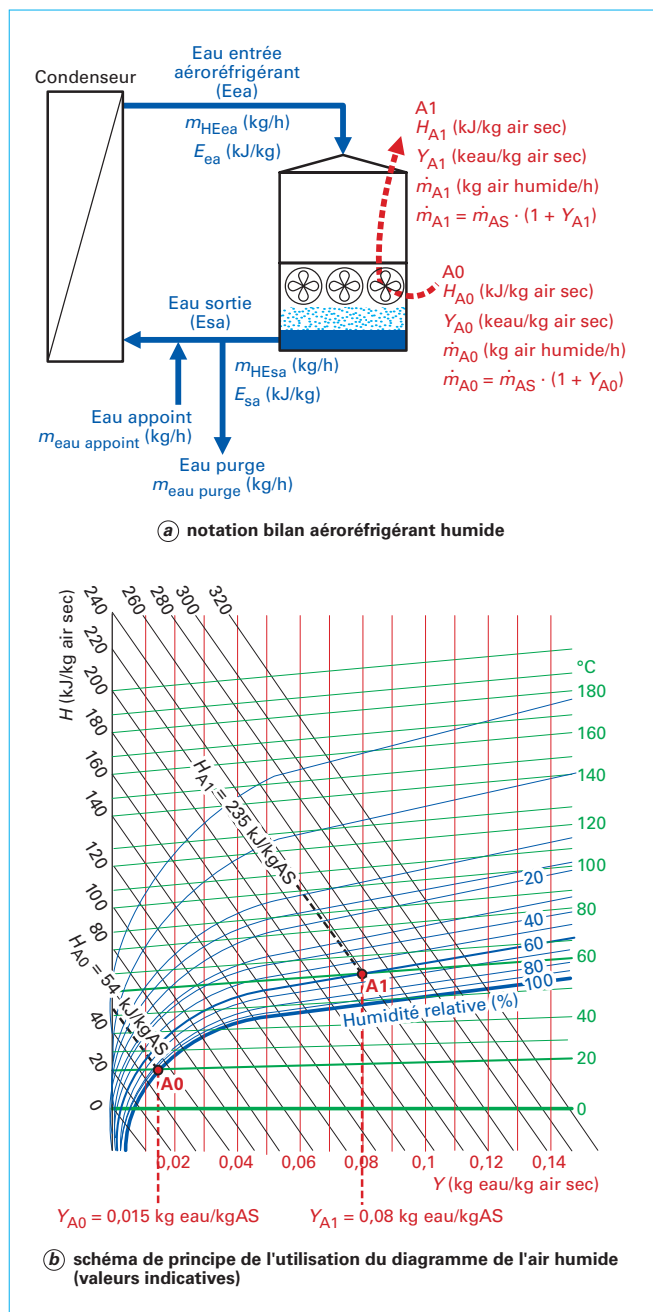


Figure 16 – Établissement des bilans pour un aérorefrigérant humide

formation du panache, au-dessus du réfrigérant atmosphérique, est simplement l'indication que l'air émis a une teneur en vapeur d'eau supérieure à la limite correspondant à la température ambiante.

Signalons également qu'il est important de placer l'appareil dans une zone bien aérée pour que l'air aspiré soit bien renouvelé. C'est ainsi qu'il est fréquent d'installer ces appareils sur les toits de bâtiments. L'emplacement doit également tenir compte du sens des vents dominants.

Les aérorefrigérants humides sont généralement dimensionnés pour les conditions les plus défavorables, à savoir une entrée d'air chaud et humide, par exemple, saturé à 20 °C comme décrit figure 16b (point A0). Les caractéristiques de l'air en sortie (débit, teneur en eau et enthalpie) dépendent de l'efficacité de l'aérorefrigérant et de la température d'entrée de l'eau à refroidir (par exemple 60 % d'humidité à 60 °C (point A1)). Sur la base des bilans de matière et d'énergie, il est alors possible de déterminer le débit d'air à imposer en entrée (\dot{m}_{A0}) et la quantité d'eau évaporée ($\dot{m}_{Eea} - \dot{m}_{Esa}$) dans l'air en fonction du débit d'eau à traiter :

– bilans matières (équation (40)) :

$$\begin{aligned} \dot{m}_{Eea} - \dot{m}_{Esa} &= \dot{m}_{A1} - \dot{m}_{A0} = \dot{m}_{\text{eau évaporée}} = \dot{m}_{AS} (Y_{A1} - Y_{A0}) \\ \Rightarrow \dot{m}_{Esa} &= \dot{m}_{Eea} - \dot{m}_{AS} (Y_{A1} - Y_{A0}) \end{aligned} \quad (40)$$

– bilan enthalpique (équation (41)) :

$$\begin{aligned} \dot{m}_{Eea} H_{Eea} - \dot{m}_{Esa} H_{Esa} &= \dot{m}_{AS} (H_{A1} - H_{A0}) \\ \Rightarrow \dot{m}_{Eea} H_{Eea} - (\dot{m}_{Eea} - \dot{m}_{AS} (Y_{A1} - Y_{A0})) H_{Esa} &= \dot{m}_{AS} (H_{A1} - H_{A0}) \\ \Rightarrow \dot{m}_{Eea} (H_{Eea} - H_{Esa}) &= \dot{m}_{AS} [(H_{A1} - H_{A0}) - (Y_{A1} - Y_{A0}) H_{Esa}] \\ \Rightarrow \dot{m}_{AS} &= \dot{m}_{Eea} \frac{(H_{Ee} - H_{Es})}{(H_{A1} - H_{A0}) - (Y_{A1} - Y_{A0}) H_{Esa}} \\ \Rightarrow \dot{m}_{A0} &= \left(\dot{m}_{Eea} \frac{(H_{Ee} - H_{Es})}{(H_{A1} - H_{A0}) - (Y_{A1} - Y_{A0}) H_{Esa}} \right) (1 + Y_{A0}) \end{aligned} \quad (41)$$

- avec $\dot{m}_{A0}, \dot{m}_{A1}$ débits d'air en entrée et en sortie (kg air · h⁻¹),
- Y_{A0}, Y_{A1} teneurs en eau de l'air entrant et sortant (kg eau · kg air sec⁻¹),
- H_{A0}, H_{A1} enthalpies de l'air entrant et sortant (kJ · kg air sec⁻¹),
- $\dot{m}_{Eea}, \dot{m}_{Esa}$ débits d'eau en entrée d'aérorefrigérant (ea) et en sortie d'aérorefrigérant (sa) (kg/h),
- H_{Eea}, H_{Esa} enthalpies de l'eau à l'entrée et à la sortie de l'aérorefrigérant (kJ/kg).

Dans ce type de réfrigérant, de l'eau se vaporisant avec l'air, le circuit doit être complété par de l'eau neuve, dite **eau d'appoint**. Comme celle-ci contient généralement des sels, il est indispensable de prévoir également un **débit de purge** pour éviter la concentration des sels dans le circuit et les dépôts qui pourraient en résulter.

La dureté de l'eau est due principalement aux sels de calcium et de magnésium. En France, elle est exprimée en degrés hydrotimétriques (TH). 1 °F équivaut à une concentration de 4 mg/L de calcium ou 2,43 mg/L de magnésium ou encore 10 mg CaCO₃/L. Une eau est considérée comme « très douce » entre 0 et 10 °F, « douce » entre 10 °F et 20 °F, « moyennement dure » entre 20 °F et 30 °F, « dure » entre 30 et 40 °F et « très dure » entre 40 et 50 °F.

Sachant que, dans un aérorefrigérant, la dureté de l'eau en circulation ne doit pas dépasser 15 °F, l'eau d'appoint doit être une eau traitée. Souvent, elle est préparée à partir de condensats issus de l'atelier de concentration.

En négligeant les pertes par entraînement, le débit de la purge de déconcentration est calculé en fonction de la dureté de l'eau d'appoint ($TH_{\text{eau appoint}}$) et de la dureté maximale dans la boucle de refroidissement ($TH_{\text{eau boucle}}$) en considérant la conservation de la matière (équation (42)) :

$$\dot{m}_{\text{eau purge}} = \frac{TH_{\text{eau appoint}}}{(TH_{\text{eau boucle}} - TH_{\text{eau appoint}})} \dot{m}_{\text{eau évaporée}} \quad (42)$$

avec $\dot{m}_{\text{eau évaporée}}$ débit de vapeur émise au niveau de l'aérorefrigérant.

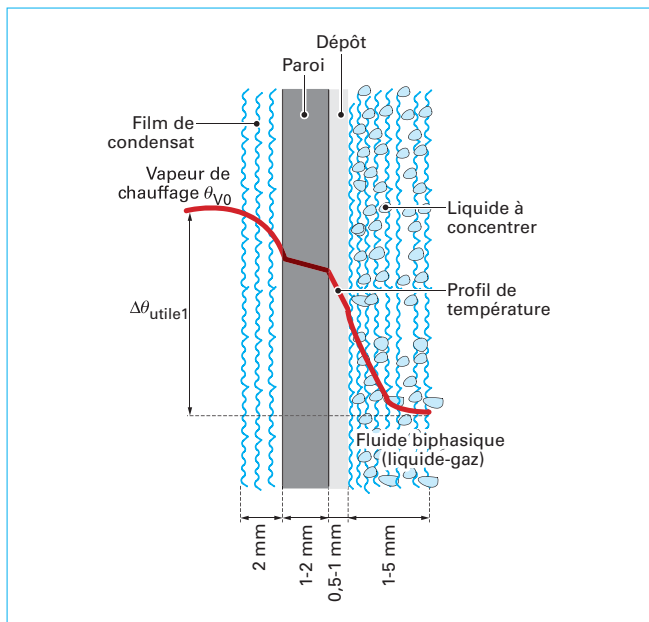


Figure 17 – Schématisation du profil de température lors du transfert de chaleur à travers une paroi d'une vapeur en condensation à un liquide en ébullition

Exemple : si l'eau d'appoint a une dureté de 5 °F, en reprenant les chiffres ci-dessus, le débit de purge à prévoir serait de 0,5 kg/kg eau évaporée. Le débit d'eau d'appoint à introduire est donc égal 1,5 fois le débit d'eau évaporée, ce qui est loin d'être négligeable. C'est donc une donnée qu'il faut absolument prendre en compte lors de la définition des utilités, des économies étant possibles en adaptant le débit de déconcentration à la charge réelle de l'installation.

2.3 Estimation du coefficient de transfert de chaleur global

Il s'agit certainement du point le plus difficile, car ce coefficient de transfert dépend de nombreux paramètres souvent impossibles à estimer. Nous allons donc simplement donner quelques éléments permettant de percevoir l'influence de plusieurs paramètres.

On peut considérer que le coefficient de transfert global est la résultante de plusieurs coefficients de transfert (équation (43)) :

$$\frac{1}{h_G} = \frac{1}{h_V} + \frac{1}{h_{paroi}} + \frac{1}{h_{dépôt}} + \frac{1}{h_L} = \frac{1}{h_V} + \frac{e_{paroi}}{\lambda_{paroi}} + \frac{e_{dépôt}}{\lambda_{dépôt}} + \frac{1}{h_L} \quad (43)$$

Le transfert de chaleur à travers une paroi, d'une vapeur en condensation vers un liquide à l'ébullition, peut être représenté comme sur la figure 17.

2.3.1 Transfert de chaleur du côté de la vapeur en condensation

La vapeur de chauffage se condense en formant un film de condensat le long de la paroi. Tant que le film de condensat est de faible épaisseur et surtout que le taux de gaz incondensable est faible, le coefficient de transfert côté vapeur (h_V) est important, d'où un faible écart de température dans l'épaisseur du film.

Dans le cas d'une vapeur surchauffée, le coefficient de transfert est beaucoup plus faible (cf. § 2.1.1) et cela justifie la nécessité de désurchauffer.

2.3.2 Transfert de chaleur à travers la paroi

La chaleur traverse ensuite la paroi. Cette dernière est plus souvent constituée d'acier inoxydable et son épaisseur est suffisamment fine (1 à 2 mm) pour que le coefficient de transfert (h_{paroi}) soit important.

2.3.3 Transfert de chaleur au travers du dépôt

Ce coefficient de transfert à travers le dépôt est rarement isolable. Il est important de retenir que la formation d'un dépôt induit une chute significative du coefficient de transfert de chaleur. Il ne faut pas oublier qu'une température de paroi élevée favorise les réactions et que cette température est nettement plus forte que celle que l'on mesure dans le flux global du liquide. Cet écart est parfois suffisant pour induire une cristallisation (sels) ou une insolubilisation (protéines) de certains composés.

2.3.4 Transfert de chaleur du côté du liquide

Le coefficient de transfert de chaleur du côté du liquide est certainement le plus limitant donc le plus important à prédire, mais c'est aussi le plus difficile à estimer. Ali Adib et Vasseur [1] ont montré que la plupart des relations proposées mettent en œuvre de nombreux paramètres (viscosité et tension superficielle de la solution, flux de chaleur et régime d'ébullition) difficiles à quantifier dans les conditions de fonctionnement.

Toutefois, il est important de distinguer le régime d'ébullition « nucléé », où des bulles de vapeur se forment au sein même du liquide et entraînent une agitation de celui-ci, du régime d'ébullition « non nucléé », où le transfert de chaleur dans le liquide, de la paroi à la surface, a lieu par convection naturelle. Nous repreneons ci-dessous des éléments développés dans les compléments de la partie évaporation de l'ouvrage publié par Bimbenet *et al.* [6].

Nukiyama a montré que la densité de flux thermique entre le liquide (de l'eau) et la paroi dépend de l'écart de température (figure 18) :

- la zone AB décrit l'ébullition non nucléée aux faibles $\Delta\theta$. La chaleur reçue par l'eau alimente le changement d'état à l'interface liquide/vapeur, en surface du film liquide, sans formation de bulles contre la paroi d'échange. Dans cette zone, le coefficient d'échange varie avec $\Delta\theta$ à la puissance 2 à 3 environ ;

- la zone BC décrit l'ébullition nucléée. Les bulles se forment contre la surface chaude. Leur croissance et leur détachement créent une agitation de nucléation qui explique le changement de pente par rapport au segment AB d'ébullition non nucléée. Dans cette zone, le coefficient d'échange varie avec $\Delta\theta$ à la puissance 4 à 5 environ.

Ainsi l'expérience de Nukiyama montre que le coefficient de transfert varie fortement avec l'écart de température entre la paroi et le liquide et que le régime d'ébullition nucléé ou le régime non nucléé conduit à des coefficients de transfert très différents. Pour l'eau, le passage d'un régime à l'autre se situe autour de 5 °C.

Pour la concentration de produits alimentaires dans un évaporateur, plusieurs phénomènes éloignent de l'expérience de Nukiyama réalisée avec de l'eau :

- la viscosité plus élevée des solutions conduit à des coefficients de transfert de chaleur plus bas ;
- la possibilité d'une ébullition nucléée dès un très faible écart de température du fait des particules présentes dans le liquide alimentaire (protéines, particules, fibres...) et des gaz dissous. Par exemple 0,5 °C pour du lait d'après Bouman (1993) comme mentionné par Ali Adib et Vasseur [1] ;

Tableau 3 – Ordres de grandeur de coefficients de transfert selon la nature des fluides de part et d'autre de la surface (d'après [6])

Coefficient de transfert	Type d'échange et configuration	Valeurs courantes du coefficient (W · m ⁻² · °C ⁻¹)
Vapeur/paroi (h _v)	Vapeur condensant en film	5 000 à 15 000
	Zone riche en gaz incondensables	200 à 2 000
	Zone en vapeur surchauffée	50 à 100
Paroi $\left(\frac{\lambda_p}{e_p}\right)$	Paroi de 1 mm en acier inoxydable	15 000
Produit/paroi h _L	Eau sans ébullition, convection naturelle	≈ 600
	Eau sans ébullition (convection forcée (1 à 6 m/s))	2 000 à 6 000
	Eau avec ébullition (Δθ = 5 °C et Δθ = 10 °C)	6 000 à 15 000
	Concentré de tomate à 30 % MS avec nucléation	≈ 300
Coefficient global h _G	Tube vertical court, grimpage (selon viscosité)	1 000 à 5 000
	Tube vertical long, flot tombant (selon viscosité)	1 000 à 8 000
	Surface raclée (selon puissance imposée)	600 à 2 300

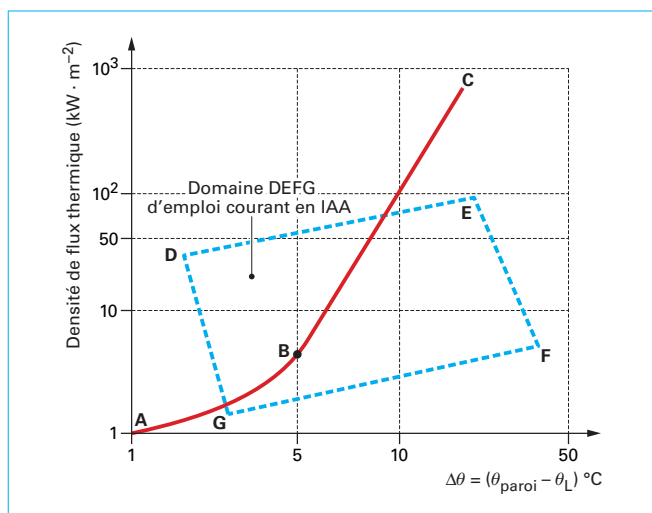


Figure 18 – Densité de flux thermique (kW · m⁻²) entre liquide/paroi, en fonction de l'écart de température. Expérience de Nukiyama [6]

– la convection « forcée » du produit dans un évaporateur à grimpage ou à descendant (cf. [F 3 004] § 1.1) qui améliore, par rapport à l'ébullition en convection naturelle, le transfert en facilitant la mise en équilibre du film de liquide.

Ainsi, le domaine courant des évaporateurs dans les industries alimentaires peut s'écarter notablement de la référence Nukiyama et se situer dans le quadrilatère DEFG (figure 18). Il reste donc une grande incertitude sur la prévision du coefficient de transfert de

chaleur côté liquide en conception d'appareil et on doit passer par des essais pilotes coûteux. On peut toutefois retenir qu'il est préférable que le transfert ait lieu avec une ébullition nucléée côté liquide.

Le tableau 3 présente des coefficients de transfert de chaleur. Il est évident, à leur lecture, que les conditions de transfert dépendent très fortement de nombreux paramètres.

Comme il est explicité dans la partie [F 3 004], le choix du type d'évaporation dépend grandement de la nature du produit à concentrer.

3. Données sur l'eau bouillante et sur la vapeur saturante

Nous avons rassemblé dans ce paragraphe les principales données physiques et thermodynamiques concernant l'eau et la vapeur saturante :

- entre 0 et 160 °C et pour des pressions allant jusqu'à 6 bar (tableau 4) [26] ;
- entre 0 et 374 °C pour des pressions plus élevées allant jusqu'à 200 bar (tableau 5) [26].

De plus, la figure 19 présente le diagramme de Mollier H-S [6] mentionné au paragraphe 1.1.9 pour la détermination graphique de la vapeur surchauffée.

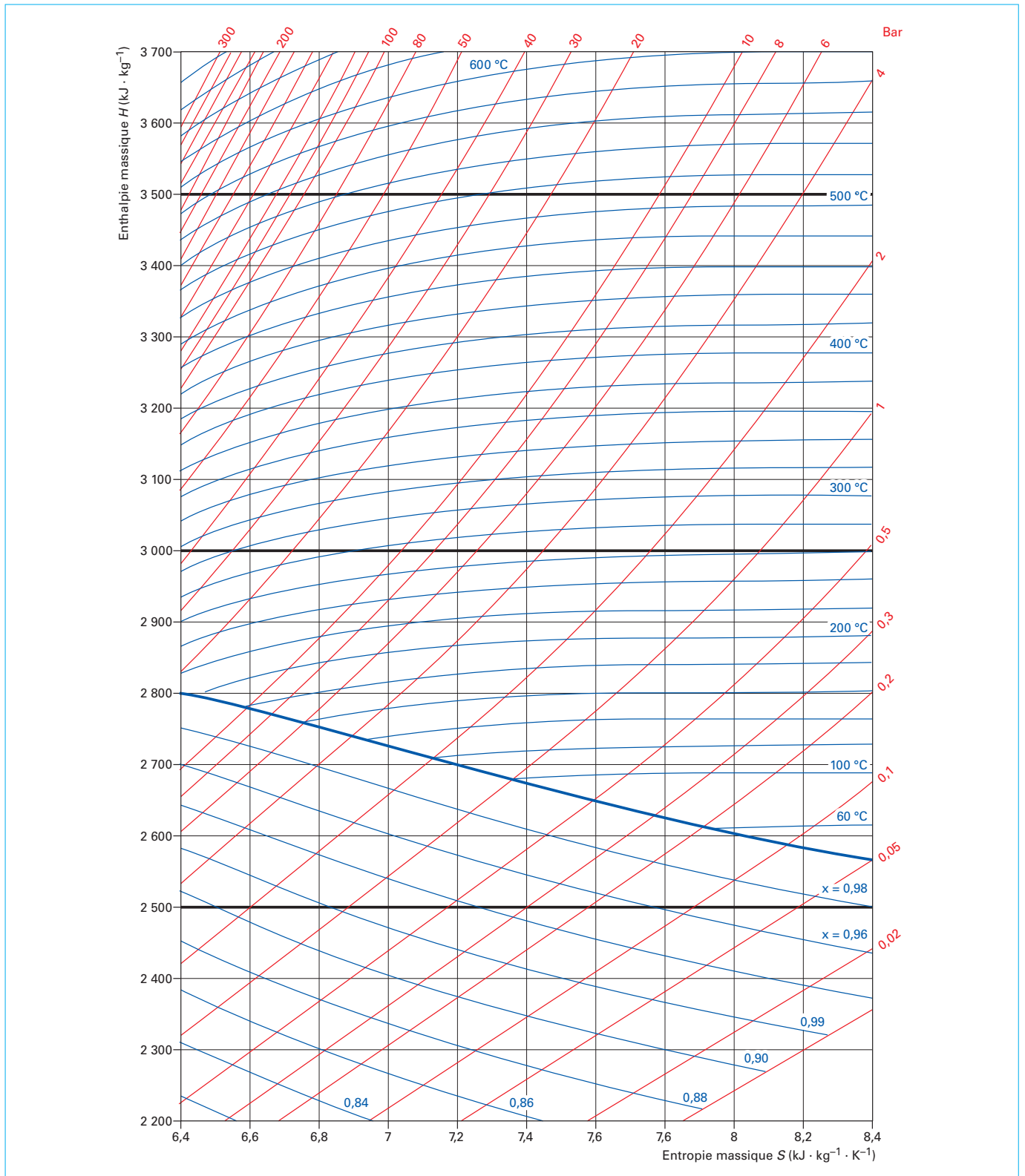


Figure 19 – Diagramme de Mollier (H-S) [6] (reproduit avec l'autorisation des éditions Dunod)

Tableau 4 – Données pour l'eau bouillante et la vapeur d'eau saturée entre 0 et 160 °C [26]

Température d'ébullition (°C)	Pression absolue (bar)	Enthalpies			Volumes spécifiques		Masse volumique
		H_L (kJ/kg)	$H_V - H_L$ (kJ/kg)	H_V (kJ/kg)	V_L (m ³ /kg)	V_V (m ³ /kg)	ρ_V (kg/m ³)
0,00	0,00610	- 0,04	2 501,1	2 501,1	0,0010002	206,136	0,00485
0,01	0,006130	0,01	2 501,3	2 501,4	0,0010002	206,20	0,00485
1	0,007056	4,16	2 499,0	2 503,2	0,0010001	192,60	0,00519
5	0,00872	21,0	2 489,7	2 510,7	0,0010000	147,20	0,00679
10	0,01227	42,0	2 477,9	2 519,9	0,0010003	106,40	0,00940
15	0,01704	62,9	2 466,1	2 529,1	0,0010008	77,98	0,0128
20	0,02337	83,9	2 454,3	2 538,2	0,0010017	57,84	0,0173
25	0,03166	104,8	2 442,5	2 547,3	0,0010029	43,40	0,0230
30	0,04241	125,7	2 430,7	2 556,4	0,0010043	32,93	0,0304
35	0,05622	146,6	2 418,8	2 565,4	0,0010060	25,24	0,0396
40	0,07375	167,5	2 406,9	2 574,4	0,0010078	19,55	0,0512
45	0,09582	188,4	2 394,9	2 583,3	0,0010099	15,28	0,0655
50	0,12335	209,3	2 382,9	2 592,2	0,0010121	12,05	0,0830
51	0,12961	213,4	2 380,5	2 593,9	0,0010126	11,50	0,0870
52	0,13613	217,2	2 378,1	2 595,7	0,0010131	10,98	0,0912
53	0,14293	221,8	2 375,7	2 597,5	0,0010136	10,49	0,0953
54	0,15002	226,0	2 373,2	2 599,2	0,0010140	10,02	0,0998
55	0,15741	230,2	2 370,8	2 601,0	0,0010145	9,58	0,1044
56	0,16511	234,3	2 368,4	2 602,7	0,0010150	9,16	0,1092
57	0,17313	238,5	2 365,9	2 604,5	0,0010156	8,76	0,1142
58	0,18147	242,7	2 363,5	2 606,2	0,0010161	8,38	0,1193
59	0,19016	246,9	2 361,1	2 608,0	0,0010166	8,02	0,1247
60	0,19920	251,1	2 358,6	2 609,7	0,0010171	7,68	0,1302
61	0,2086	255,3	2 356,2	2 611,4	0,0010177	7,35	0,1360
62	0,2184	259,5	2 353,7	2 613,2	0,0010182	7,04	0,1420
63	0,2286	263,6	2 351,3	2 614,9	0,0010188	6,75	0,1482
64	0,2391	267,8	2 348,8	2 616,6	0,0010193	6,47	0,1546
65	0,2501	272,0	2 346,3	2 618,4	0,0010199	6,20	0,1612
66	0,2615	276,2	2 343,9	2 620,1	0,0010205	5,95	0,1681
67	0,2733	280,4	2 341,4	2 621,8	0,0010211	5,71	0,1752
68	0,2856	284,6	2 338,9	2 623,5	0,0010217	5,48	0,1826
69	0,2984	288,8	2 336,4	2 625,2	0,0010223	5,26	0,1903
70	0,3116	293,0	2 334,0	2 626,9	0,0010228	5,05	0,1982
71	0,3253	297,2	2 331,5	2 628,6	0,0010235	4,85	0,2063
72	0,3396	301,3	2 329,0	2 630,3	0,0010241	4,66	0,2148
73	0,3543	305,5	2 326,5	2 632,0	0,0010247	4,47	0,2235
74	0,3696	309,7	2 324,0	2 633,7	0,0010253	4,30	0,2326
75	0,3855	313,9	2 321,5	2 635,4	0,0010259	4,13	0,2419
76	0,4019	318,1	2 318,9	2 637,1	0,0010266	3,98	0,2515
77	0,4189	322,3	2 316,4	2 638,7	0,0010272	3,24	0,2615
78	0,4365	326,5	2 313,9	2 640,4	0,0010279	3,68	0,2718

Tableau 4 – Données pour l’eau bouillante et la vapeur d’eau saturée entre 0 et 160 °C [26] (suite)

Température d'ébullition (°C)	Pression absolue (bar)	Enthalpies			Volumes spécifiques		Masse volumique
		H_L (kJ/kg)	$H_V - H_L$ (kJ/kg)	H_V (kJ/kg)	V_L (m ³ /kg)	V_V (m ³ /kg)	ρ_v (kg/m ³)
79	0,4547	330,7	2 311,4	2 642,1	0,0010285	3,54	0,2824
80	0,4736	334,9	2 308,8	2 643,8	0,0010292	3,41	0,2933
81	0,4931	339,1	2 306,3	2 645,4	0,0010299	3,28	0,3046
82	0,5133	343,3	2 303,8	2 647,1	0,0010305	3,16	0,3163
83	0,5342	347,5	2 301,2	2 648,7	0,0010312	3,05	0,3283
84	0,5557	351,7	2 298,7	2 650,4	0,0010319	2,93	0,3407
85	0,5780	355,9	2 296,5	2 652,0	0,0010326	2,83	0,3535
86	0,6011	360,1	2 293,1	2 653,6	0,0010333	2,73	0,3667
87	0,6249	364,3	2 290,9	2 655,3	0,0010340	2,63	0,3803
88	0,6495	368,5	2 288,4	2 656,9	0,0010347	2,54	0,3942
89	0,6749	372,7	2 285,8	2 658,5	0,0010354	2,45	0,4087
90	0,7011	376,9	2 283,2	2 660,1	0,0010361	2,36	0,4235
91	0,7281	381,1	2 280,6	2 661,7	0,0010369	2,28	0,4388
92	0,7561	385,4	2 278,0	2 663,4	0,0010376	2,20	0,4545
93	0,7849	389,6	2 275,4	2 665,0	0,0010384	2,12	0,4707
94	0,8146	393,8	2 272,8	2 666,6	0,0010391	2,05	0,4873
95	0,8453	398,0	2 270,2	2 668,1	0,0010399	1,98	0,5045
96	0,8769	402,2	2 267,5	2 669,7	0,0010406	1,91	0,5221
97	0,9094	406,4	2 264,9	2 671,3	0,0010414	1,85	0,5402
98	0,9430	410,6	2 262,2	2 672,9	0,0010421	1,79	0,5589
99	0,9776	414,8	2 259,6	2 674,4	0,0010429	1,73	0,5780
100	1,0133	419,1	2 256,9	2 676,0	0,0010437	1,67	0,5977
101	1,0500	423,3	2 254,3	2 677,6	0,0010445	1,62	0,6180
102	1,0878	427,5	2 251,6	2 679,1	0,0010453	1,57	0,6388
103	1,1267	431,7	2 248,9	2 680,7	0,0010461	1,51	0,6601
104	1,1668	435,9	2 246,3	2 682,2	0,0010469	1,47	0,6821
105	1,2080	440,2	2 243,6	2 683,7	0,0010477	1,42	0,7046
106	1,2504	444,4	2 240,9	2 685,3	0,0010485	1,37	0,7277
107	1,2941	448,6	2 238,2	2 686,8	0,0010494	1,33	0,7515
108	1,3390	452,8	2 235,4	2 688,3	0,0010502	1,30	0,7758
109	1,3852	457,1	2 232,7	2 689,8	0,0010510	1,25	0,8008
110	1,4327	461,3	2 230,0	2 691,3	0,0010519	1,21	0,8265
111	1,4815	465,5	2 227,3	2 692,8	0,0010527	1,17	0,8528
112	1,5316	469,8	2 224,5	2 694,3	0,0010536	1,14	0,8798
113	1,5832	474,0	2 221,8	2 695,8	0,0010544	1,10	0,9075
114	1,6362	478,3	2 219,0	2 697,2	0,0010553	1,07	0,9359
115	1,6906	482,5	2 216,2	2 698,7	0,0010562	1,04	0,9650
116	1,7465	486,7	2 213,4	2 700,2	0,0010571	1,00	0,9948
117	1,8039	491,0	2 210,7	2 701,6	0,0010579	0,9753	1,025
118	1,8628	495,2	2 207,9	2 703,1	0,0010588	0,9463	1,057
119	1,9233	499,5	2 205,1	2 704,5	0,0010597	0,9184	1,089

Tableau 4 – Données pour l’eau bouillante et la vapeur d’eau saturée entre 0 et 160 °C [26] (suite)

Température d'ébullition (°C)	Pression absolue (bar)	Enthalpies			Volumes spécifiques		Masse volumique
		H_L (kJ/kg)	$H_V - H_L$ (kJ/kg)	H_V (kJ/kg)	V_L (m ³ /kg)	V_V (m ³ /kg)	ρ_V (kg/m ³)
120	1,9854	503,7	2 202,2	2 706,0	0,0010606	0,8915	1,122
121	2,0492	508,0	2 199,4	2 707,4	0,0010615	0,8655	1,155
122	2,1145	512,2	2 196,6	2 708,8	0,0010625	0,8405	1,190
123	2,1816	516,5	2 193,7	2 710,2	0,0010634	0,8162	1,225
124	1,2504	520,7	2 190,9	2 711,6	0,0010643	0,7928	1,261
125	2,3210	525,0	2 188,0	2 713,0	0,0010652	0,7702	1,298
126	2,3933	529,2	2 185,2	2 714,4	0,001 066 2	0,7484	1,336
127	2,4675	533,5	2 182,3	2 715,8	0,001 067 1	0,7273	1,375
128	2,5435	537,8	2 179,4	2 717,2	0,001 068 1	0,7069	1,415
129	2,6215	542,0	2 176,5	2 718,5	0,001 069 1	0,6872	1,455
130	2,7013	546,3	2 173,6	2 719,9	0,001 070 0	0,6681	1,497
131	2,7831	550,6	2 170,7	2 721,3	0,001 071 0	0,6497	1,539
132	2,8670	554,8	2 167,8	2 722,6	0,001 072 0	0,6319	1,583
133	2,9528	559,1	2 164,8	2 723,9	0,001 073 0	0,6146	1,627
134	3,041	563,4	2 161,9	2 725,3	0,0010740	0,5980	1,672
135	3,131	567,7	2 158,9	2 726,6	0,0010750	0,5818	1,719
136	3,223	572,0	2 155,9	2 727,9	0,0010760	0,5662	1,766
137	3,317	576,2	2 153,0	2 729,2	0,0010770	0,5511	1,815
138	3,414	580,5	2 150,0	2 730,5	0,0010780	0,5364	1,864
139	3,513	584,8	2 147,0	2 731,8	0,0010790	0,5222	1,915
140	3,614	589,1	2 144,0	2 733,1	0,0010801	0,5085	1,967
141	3,717	593,4	2 140,9	2 734,3	0,0010811	0,4952	2,019
142	3,823	597,7	2 137,9	2 735,6	0,0010821	0,4823	2,073
143	3,931	602,0	2 134,9	2 736,9	0,0010832	0,4698	2,129
144	4,042	606,3	2 131,8	2 738,1	0,0010843	0,4577	2,185
145	4,155	610,6	2 128,7	2 739,3	0,0010853	0,4460	2,242
146	4,271	614,9	2 125,7	2 740,6	0,0010864	0,4346	2,301
147	4,389	619,2	2 122,6	2 741,8	0,0010875	0,4236	2,361
148	4,510	623,5	2 119,5	2 743,0	0,0010886	0,4129	2,422
149	4,634	627,8	2 116,3	2 744,2	0,0010897	0,4025	2,484
150	4,760	632,1	2 113,2	2 745,4	0,0010908	0,3924	2,548
151	4,889	636,5	2 110,1	2 746,5	0,0010919	0,3827	2,613
152	5,021	640,8	2 106,9	2 747,7	0,0010930	0,3732	2,679
153	5,155	645,1	2 103,8	2 748,9	0,0010941	0,3640	2,747
154	5,293	649,4	2 100,6	2 750,0	0,0010953	0,3551	2,816
155	5,433	653,8	2 097,4	2 751,2	0,0010964	0,3464	2,886
156	5,577	658,1	2 094,2	2 752,3	0,001098	0,3380	2,958
157	5,723	662,4	2 091,0	2 753,4	0,001099	0,3299	3,032
158	5,872	666,8	2 087,7	2 754,5	0,001100	0,3219	3,106
159	6,025	671,1	2 084,5	2 755,6	0,001101	0,3142	3,182
160	6,181	675,5	2 081,3	2 756,7	0,001102	0,3068	3,260

Tableau 5 – Données pour l’eau bouillante et la vapeur d’eau saturée entre 0 et 374 °C [26]

Température d'ébullition (°C)	Pression absolue (bar)	Enthalpies			Volumes spécifiques	
		H_L (kJ/kg)	$H_V - H_L$ (kJ/kg)	H_V (kJ/kg)	V_L (m ³ /kg)	V_V (m ³ /kg)
6,98	0,010	29,3	2 484,9	2 514,2	0,0010002	129,208
32,88	0,050	137,8	2 423,7	2 561,5	0,0010053	28,192
45,81	0,10	191,8	2 392,8	2 584,7	0,0010102	14,674
81,33	0,50	340,5	2 305,4	2 645,9	0,0010300	3,240
99,63	1,00	417,5	2 258,0	2 675,5	0,0010432	1,694
120,23	2,00	504,7	2 201,9	2 705,7	0,0010605	0,886
133,55	3,00	561,5	2 163,8	2 725,3	0,0010732	0,606
143,63	4,0	604,7	2 133,8	2 738,6	0,0010836	0,462
151,85	5,0	640,2	2 108,5	2 748,7	0,0010926	0,375
158,85	6,0	670,6	2 086,3	2 756,8	0,0011006	0,316
164,97	7,0	697,2	2 066,3	2 763,5	0,0011080	0,273
170,43	8,0	721,1	2 048,0	2 769,1	0,0011148	0,240
175,33	9,0	742,8	2 031,1	2 773,9	0,0011212	0,215
179,91	10,0	762,8	2 015,3	2 778,1	0,0011273	0,194
184,09	11,0	781,3	2 000,4	2 781,7	0,0011330	0,177
187,99	12,0	798,7	1 986,2	2 784,8	0,0011385	0,163
191,64	13,0	814,9	1 972,7	2 787,5	0,0011438	0,151
195,07	14,0	830,3	1 959,7	2 790,0	0,0011489	0,141
198,32	15,0	844,9	1 947,3	2 792,2	0,0011539	0,132
205,76	17,5	878,5	1 917,9	2 796,4	0,0011656	0,113
212,42	20,0	908,8	1 890,7	2 799,5	0,0011767	0,100
218,45	22,5	936,5	1 865,2	2 801,7	0,0011872	0,887
223,99	25,0	952,1	1 851,0	2 803,1	0,0011973	0,800
233,90	30,0	1 008,4	1 795,7	2 804,2	0,0012165	0,667
242,60	35,0	1 049,8	1 753,7	2 803,4	0,0012347	0,571
250,40	40,0	1 087,3	1 714,1	2 801,4	0,0012522	0,498
263,99	50,0	1 154,2	1 640,1	2 794,3	0,0012859	0,394
275,64	60,0	1 213,4	1 571,6	2 784,3	0,0013187	0,324
285,88	70,0	1 267,0	1 505,1	2 772,1	0,0013513	0,274
295,06	80,0	1 316,6	1 441,3	2 758,0	0,0013842	0,235
303,40	90,0	1 363,3	1 378,9	2 742,1	0,0014178	0,205
311,06	100,0	1 407,6	1 317,1	2 724,7	0,0014524	0,180
342,24	150,0	1 610,5	1 000,0	2 610,5	0,0016581	0,103
365,51	200,0	1 826,3	583,4	2 409,7	0,0020360	0,058
374,14	220,9	2 099,3	0,0	2 099,3	0,0031550	0,031

Évaporation

par **Martine DECLoux**

Professeur de génie des procédés à AgroParisTech

et **Bernard RÉMOND**

Responsable R & D Évaporation
GEA Process Engineering France

À lire également dans nos bases

DECLoux (M.) et RÉMOND (B.). – *Évaporation. Agencement des évaporateurs et applications.* [F 3 004] Base documentaire « Agroalimentaire » (2009).

VASSEUR (J.). – *Séchage : principe de calcul d'appareil. Séchage convectif par air chaud.* [J 2 451], [J 2 452] Base documentaire « Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique » (2009).

ARLABOSSE (P.). – *Séchage : aspects pratiques.* [J 2 455] Base documentaire « Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique » (2008).
Diagrammes de l'air humide. [Ann. J 2 451], [Ann. J 2 452], [Ann. J 2 453] (2009).

Sources bibliographiques

- [1] ALI ADIB (T.) et VASSEUR (J.). – *Bibliographic analysis of predicting heat transfer coefficients in boiling for applications in designing liquid food evaporators.* Journal of Food Engineering, p. 149-161 (2008).
- [2] AUZENET (E.) et CLERC-RENAUD (M.). – *Pompes à chaleur. Systèmes à compression de vapeur.* [BE 9 620] Éditions TI, Techniques de l'Ingénieur, base documentaire « Génie énergétique » (2005).
- [3] AUZENET (E.) et CLERC-RENAUD (M.). – *Pompes à chaleur. Application et systèmes particuliers.* [BE 9 621] Éditions TI, Techniques de l'Ingénieur, base documentaire « Génie énergétique » (2006).
- [4] BENAICHE (J.). – *Jus d'orange concentré : extraction et conservation.* [F 6 280] Éditions TI, Techniques de l'Ingénieur, base documentaire « Agroalimentaire » (2001).
- [5] BERTIN. – *Thermocompresseurs multistadiés.* Documentation interne.
- [6] BIMBENET (J.-J.), DUQUENOY (A.) et TRYSTRAM (G.). – *Génie des procédés alimentaires. Des bases aux applications.* 2^e édition. Dunod (Paris) (2007).
- [7] BIREN (J.-M.) et ORNELLAS (C.). – *Les aérorefrigérants ; volet pollution de l'air.* Rapport de l'inspection générale de l'environnement (IGE/02/043), 30 p. (2004).
- [8] BUBNIK (Z.), KADLEC (P.), URBAN (D.) et BRUHNS (M.). – *Sugar technologists manual. Chemical and physical data for sugar manufacturers and users.* 8^e édition. Éd. Bartens, 417 p. (1995).
- [9] CHEN (C.S.) et HERNANDEZ (E.). – *Design and performance evaluation of evaporation.* In : VALENTAS (K.J.), ROSTSTEIN (E.),

- SINGH (R.P.) Handbook of food engineering practice, CRC press., p. 211-251 (1997).
- [10] CHOI (Y.) et OKOS (M.R.). – *Effect of temperature and composition of the thermal properties of foods.* In : LE MAGUER (M.), JELEN (P.) : Food engineering and process applications, Transport phenomena. Londres, Éd. Elsevier, vol. 1, p. 93-101 (1986).
- [11] ProSim SA. – *Component Plus.* Base de données thermodynamique des corps purs associée aux logiciels de simulation.
- [12] DECLoux (M.) et BORIES (A.). – *Traitement et valorisation des vinasses. Problématique et synthèse des voies de valorisation étudiée et envisagées.* Industries Alimentaires et Agricoles, (7/8), p. 61-73 (2001).
- [13] DECLoux (M.). – *Procédé de transformation en sucrerie.* [F 6 150], [F 6 151] Éditions TI, Techniques de l'Ingénieur, base documentaire « Agroalimentaire » (2003).
- [14] GAUTHIER (A.). – *Les applications de l'électricité dans l'industrie agroalimentaire.* Paris, Lavoisier (1998).
- [15] GÉNOTELLE (J.). – *Étude des tables relatives à la vapeur d'eau. Formulation mathématique et utilisation pratique.* Sucrerie Française, p. 357-367, nov. 1980.
- [16] GICQUEL (R.). – *Diagrammes thermodynamiques. Généralités.* [BE 8 040] Éditions TI, Techniques de l'Ingénieur, base documentaire « Génie énergétique » (2002).
- [17] KIRILLIN (V.), SYTCHEV (V.) et SHEINDLIN (A.). – *Thermodynamique technique.* Traduction française, éditions Mir, 592 p. (1976).
- [18] LALLEMAND (A.). – *Compression et détente des gaz ou des vapeurs.* [BE 8 013] Éditions TI, Techniques de l'Ingénieur, base documentaire « Génie énergétique » (2003).

- [19] LEMOINE (P.). – *Refroidissement des eaux.* [B 2 480] Éditions TI, Techniques de l'Ingénieur, base documentaire « Génie énergétique » (1986).
- [20] LEMOINE (P.). – *Réfrigérants atmosphériques.* [B 2 481] Éditions TI, Techniques de l'Ingénieur, base documentaire « Génie énergétique » (1986).
- [21] MANAS (B.). – *Aéroréfrigérants secs.* [B 2 482] Éditions TI, Techniques de l'Ingénieur, base documentaire « Génie énergétique » (1986).
- [22] MÉRIGOUX (J.-M.). – *Ventilateurs. Compresseurs. Notions fondamentales. Dimensionnement.* [BM 4 500] Éditions TI, Techniques de l'Ingénieur, base documentaire « Machines hydrauliques aérodynamiques et thermiques » (1999).
- [23] OUZIAUX (R.) et PERRIER (J.). – *Mécanique des fluides appliquée. Tome 2 : Fluides compressibles, aérodynamique, mesure, Dunod (1976).*
- [24] PERRY (R.H.) et GREEN (D.W.). – *Perry's chemical engineers' handbook.* 7th édition. McGraw-Hill (1997).
- [25] REYNAUD (J.-F.). – *Concentration par évaporation et recompression mécanique de vapeur.* Éd. Eyrolles, Paris (1984).
- [26] SCHMIDT (E.) et GRIGULL (U.). – *Properties of water and steam.* In : SI-units. Éd. Springer-Verlag (1982).
- [27] SCHUCK (P.), BOUHALLAB (S.), DURUPT (D.), VAREILLE (P.), HUMBERT (J.-P.) et MARIN (M.). – *Séchage des lactosérums et dérivés : rôle du lactose et de la dynamique de l'eau.* Lait, p. 243-268 (2004).

Norme et standard

Association française de normalisation AFNOR

NF ISO 9300 1990 Mesure de débit de gaz au moyen de venturi-tuyères en régime critique.

Indice de classement X10. 150.
<http://www.afnor.fr>

Support numérique

Component plus. Base de données thermodynamiques des corps purs associée aux logiciels de simulation développés par ProSim SA.

Sites Internet

ProSim SA
<http://www.prosim.net>

EHDG Guidelines : European Hygienic Engineering et Design Group (Conception hygiénique et ingénierie des équipements pour l'industrie agroalimentaire en Europe)
<http://www.ehdg.fr>

Alfa Laval Sas
<http://www.alfalaval.com>
france.info@alfalaval.com

FIVE CAIL
<http://www.fivescail.com>

Fenco SpA
fenco@fenco.it

GEA Process Engineering France
<http://www.gea-pe.fr>
gea-pe@gea-pe.fr

Réglementation

Règlement européen 1935/2004 (2004). Règlement (CE) n° 1935/2004 du Parlement européen et du Conseil du 27 octobre 2004 concernant les maté-

riaux et objets destinés à entrer en contact avec les denrées alimentaires et abrogeant les directives 80/590/CEE et 89/109/CE. 14 p.

Annuaire

Principaux fournisseurs d'évaporateurs

Alfa Laval Sas
<http://www.alfalaval.com>
france.info@alfalaval.com

Anhydro France

APV France

FIVE CAIL
<http://www.fivescail.com>

Fenco SpA (Italie) (concentration jus de tomate)
fenco@fenco.it

France évaporation (petits évaporateurs)

GEA Process Engineering France
<http://www.gea-pe.fr>
gea-pe@gea-pe.fr

Ridel Environnement

Searle

m4541

Aciers inoxydables - Propriétés. Résistance à la corrosion

Date de publication : 10/06/2000

Par :

Pierre-Jean CUNAT
Directeur technique EURO-INOX

Cet article fait partie de la base documentaire :

Matériaux: résistance à la corrosion et au vieillissement

Dans le pack : **Corrosion Vieillissement**

et dans l'univers : **Matériaux**



Cet article peut être traduit dans la langue de votre choix.
Accédez au service *Traduction à la demande* dans votre espace « Mon compte ». (Service sur devis)

Document délivré le : 17/12/2014

Pour le compte : 7200034092 - // nc EDITIONS TECHNIQUES INGENIEUR // 217.109.84.129

Pour toute question :

Service Relation clientèle - Techniques de l'Ingénieur
249 rue de Crimée - 75019 - Paris

par mail infos.clients@teching.com ou au téléphone 00 33 (0) 1 53 35 20 20

Aciers inoxydables

Propriétés. Résistance à la corrosion

par **Pierre-Jean CUNAT**

Directeur technique EURO-INOX

1. Résistance à la corrosion.....	M 4 541 – 3
1.1 Passivité.....	— 3
1.2 Interprétation électrochimique.....	— 3
1.3 Résistance à la corrosion uniforme.....	— 6
1.3.1 Généralités.....	— 6
1.3.2 Influence des éléments d’alliage.....	— 6
1.3.3 Caractéristiques chimiques principales des solutions corrosives.....	— 6
1.3.4 Milieux acides.....	— 6
1.3.5 Bases fortes : soude et potasse (NaOH et KOH).....	— 8
1.3.6 Milieux organiques.....	— 8
1.4 Résistance à la corrosion localisée.....	— 9
1.4.1 Résistance à la corrosion par piqûres.....	— 9
1.4.2 Résistance à la corrosion caverneuse.....	— 11
1.4.3 Résistance à la corrosion intergranulaire (CIG).....	— 13
1.4.4 Résistance à la corrosion sous contrainte (CSC).....	— 14
1.5 Résistance à certains types particuliers de corrosion localisée.....	— 16
1.5.1 Résistance à la corrosion galvanique.....	— 16
1.5.2 Résistance à la fatigue-corrosion.....	— 17
1.5.3 Résistance à l’érosion-corrosion et à la cavitation-corrosion.....	— 17
1.6 Résistance à la corrosion à haute température.....	— 18
1.6.1 Généralités.....	— 18
1.6.2 Cas des atmosphères oxydantes.....	— 18
1.6.3 Cas des atmosphères réductrices.....	— 19
1.7 Essais de tenue à la corrosion.....	— 20
1.7.1 Essais normalisés.....	— 20
1.7.2 Essais particuliers de laboratoire.....	— 21
1.7.3 Études de cas.....	— 22
2. Propriétés physiques et caractéristiques mécaniques.....	— 24
2.1 Aciers inoxydables martensitiques.....	— 24
2.2 Aciers inoxydables ferritiques.....	— 25
2.3 Aciers inoxydables austénitiques.....	— 26
2.4 Aciers inoxydables austénoferritiques.....	— 30
2.5 Aciers inoxydables à durcissement par précipitation.....	— 31
Pour en savoir plus.....	Doc. M 4 544

Les aciers inoxydables présentent, suivant leur teneur en chrome, dont le seuil minimal est de 10,5 %, et les traitements métallurgiques subis, un large éventail de **propriétés chimiques, physiques et mécaniques**.

Le phénomène de passivité de ces aciers présente une grande importance dans la mesure où il constitue la base du mécanisme de leur **résistance à la corrosion**.

L'étude complète du sujet comprend les articles :

- M 4 540-Aciers inoxydables. Critères de choix et structure ;
- M 4 541-Aciers inoxydables. Propriétés. Résistance à la corrosion (le présent article) ;
- M 4 542-Aciers inoxydables. Mise en œuvre ;
- M 4 543-Aciers inoxydables. Fabrication ;
- Doc. M 4 544-Aciers inoxydables.

Notations et Symboles

Symbole	Définition	Symbole	Définition
A	allongement à rupture	i_K	densité de courant cathodique
Ac_1	température à laquelle l'austénite commence à se transformer au cours du chauffage	i_p	densité de courant critique de passivation
Ac_3	température à laquelle la ferrite achève de se transformer en austénite au cours du chauffage	i_m	densité de courant d'activité maximale
E_0	module d'élasticité ou module d'Young	i_r	densité de courant résiduel
E_A	potentiel d'équilibre anodique	KCU	résilience Charpy U
E_C	potentiel de corrosion ou de dissolution	KCV	résilience Charpy V
E_K	potentiel d'équilibre cathodique	LDR	rapport limite d'emboutissage ou <i>limiting drawing ratio</i>
E_p	potentiel critique de passivation	n	coefficient d'écroûissage ou taux de consolidation
E_{piq}	potentiel de piqûre	r	coefficient d'anisotropie
E_{pp}	potentiel de passivation	R	retour élastique ou rétreint
E_{pr}	potentiel de protection ou de repassivation	R_m	résistance à la rupture par traction
E_{th}	potentiel d'équilibre	R_p	limite d'élasticité
E_{tp}	potentiel de transpassivation	$R_{p0,2}$	limite d'élasticité conventionnelle à 0,2 % d'allongement
HRB	Dureté Rockwell Échelle B	x	vitesse de corrosion
HV5	Dureté Vickers sous une charge de 5 kg	σ	contrainte
i_A	densité de courant anodique	σ_c	contrainte critique
i_C	densité de courant de corrosion	τ	contrainte de cisaillement
i_G	densité de courant global		

1. Résistance à la corrosion

1.1 Passivité

Le phénomène de passivité présente une très grande importance dans la mesure où il constitue la base du mécanisme de résistance à la corrosion des aciers inoxydables. Le phénomène de passivité se caractérise par la présence d'un film très mince (épaisseur de l'ordre de 10 à 20 nm), appelé **film passif** ou **couche passive**, à la surface de l'alliage métallique qui rend sa vitesse de corrosion négligeable. Le film passif, fortement solidaire du substrat métallique, empêche ou rend insignifiant le contact entre l'alliage et les agents plus ou moins agressifs du milieu environnant.

Pour que le phénomène de passivité puisse s'établir, et se maintenir, il est nécessaire que l'alliage fer-chrome ait une teneur minimale en chrome de l'ordre de 11 %. Autrement dit, il existe un effet de seuil au-delà duquel le phénomène de passivité peut exister et au-dessous duquel il est impossible. De plus, si la couche passive devait être détruite localement par suite d'un endommagement accidentel (rayure par exemple), elle possède la propriété de pouvoir se reconstituer dans un grand nombre de milieux, ce qui traduit la propriété d'autopassivation de l'alliage métallique dans ce milieu.

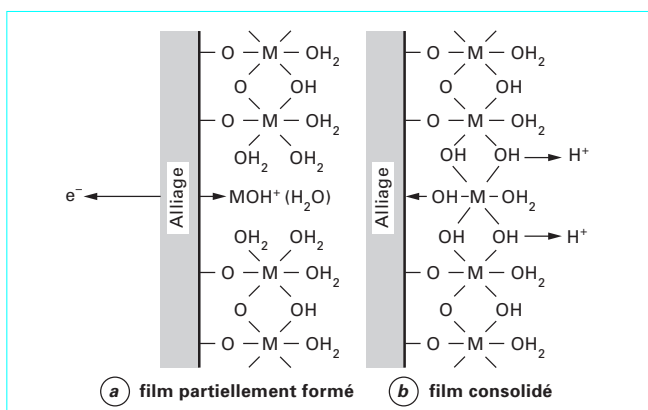


Figure 1 - Représentation schématique du film passif des aciers inoxydables, selon Okamoto et Shibata [33]

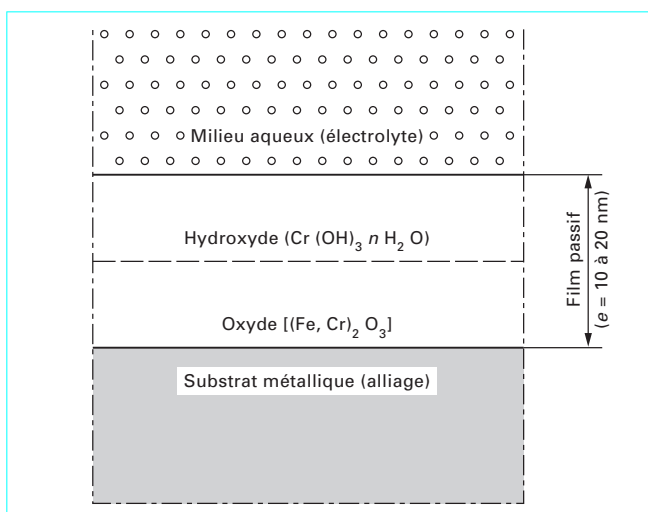


Figure 2 - Modèle bicouche du film passif

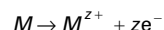
Les aciers inoxydables sont autopassivables et le schéma le plus utilisé pour décrire le mécanisme de formation de leur couche passive est emprunté à Okamoto et Shibata [33]. Sa représentation schématique est donnée à la figure 1. Les principaux éléments constituant le film passif sont d'une part des cations M^{2+} de valence z provenant du substrat et ayant une grande affinité pour l'oxygène. Il s'agit, pour l'essentiel, de Cr^{3+} et de Fe^{3+} , bien que le fer puisse se trouver sous la forme de Fe^{2+} . D'autre part, aux éléments en provenance du substrat, vont être associées des molécules d'eau provenant de la solution. Certaines molécules d'eau ayant perdu des protons H^+ , de manière à équilibrer la présence des cations métalliques donnent naissance à des ions OH^- et O^{2-} , constitutifs de l'hydroxyde ou de l'oxyde [34]. Le film passif des aciers inoxydables est de type « bicouche ». La couche interne, en contact direct avec le substrat métallique, est formée d'oxydes de type $(Fe, Cr)_2O_3$ et la couche externe est essentiellement constituée par des hydroxydes de type $Cr(OH)_3 \cdot n H_2O$. La représentation schématique de ce modèle bicouche est donnée à la figure 2.

1.2 Interprétation électrochimique

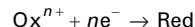
En milieux aqueux, la corrosion est un phénomène électrochimique qui met en présence un alliage métallique et un électrolyte, c'est-à-dire un milieu liquide capable de conduire l'électricité. Elle se traduit par le passage d'ions métalliques en solution.

La nature électrochimique de la corrosion en milieux aqueux d'un métal M de valence z qui se corrode est le siège de deux réactions simultanées :

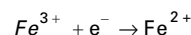
— la **réaction anodique d'oxydation** qui correspond à la dissolution du métal dans la solution ou électrolyte avec libération d'électrons :



— la **réaction cathodique de réduction** d'un oxydant dissous dans la solution s'écrit de manière générale :



dans le cas du fer, il s'agit de la réduction de l'ion métallique Fe^{3+} en un ion métallique Fe^{2+} de valence inférieure



La corrosion d'un métal tel que le fer nécessite la présence d'un oxydant dans la solution car la réaction de réduction utilise les électrons produits lors de la réaction de dissolution du métal.

Comme dans toute réaction électrochimique, les réactions anodique d'oxydation et cathodique de réduction ont un potentiel d'équilibre noté :

- E_K pour la réaction cathodique ;
- E_A pour la réaction anodique d'oxydation.

Le potentiel d'équilibre E_K correspond au potentiel que prend un métal inattaquable dans une solution qui contient un système oxydoréducteur Ox^{n+}/Red . En l'absence de tout courant imposé, il se produit un échange entre le métal et la solution et à l'équilibre, la vitesse de réduction de l'oxydant Ox^{n+} est égale à la vitesse d'oxydation au réducteur Red . La réaction correspondante s'écrit :



Si à l'aide d'une source extérieure, on impose un potentiel E différent du potentiel d'équilibre E_K , on provoque soit une réaction anodique si E est inférieur à E_K ($E < E_K$), soit une réaction cathodique si E est supérieur à E_K ($E > E_K$). Les réactions anodique (A) et cathodique (K) se traduisent par des densités de courant électrique anodique (i_A) et cathodique (i_K) évoluant en fonction de la différence de potentiel entre le métal ou alliage et la solution aqueuse. La courbe résultante ou courbe globale $i = h(E)$, obtenue en faisant varier de manière continue le potentiel (E), est la somme algébrique

des courbes individuelles de polarisation relatives à l'oxydation et à la réduction (figure 3). La valeur absolue de la densité de courant d'échange varie avec le métal ou l'alliage, son état de surface, la concentration des espèces Ox^{n+} et Red, et également avec la température.

Le potentiel d'équilibre E_A de la réaction de dissolution anodique représente le potentiel pris par le métal ou l'alliage par rapport à la solution. Pour qu'un métal ou alliage puisse se corroder, il faut qu'il existe dans la solution un oxydant tel que le potentiel d'équilibre E_K de sa réaction cathodique de réduction soit plus élevé que le potentiel d'équilibre de la réaction anodique de dissolution, c'est-à-dire que $E_K > E_A$. Dans le cas contraire ($E_K < E_A$), un processus de corrosion ne peut s'établir (figure 4). Le raisonnement basé sur les deux potentiels d'équilibre E_A et E_K reste théorique, car la complexité des alliages métalliques et des solutions ne permet pas un accès direct à ces potentiels ou aux courbes de polarisation individuelles. Par contre, la courbe globale, qui est la résultante des courbes individuelles, peut être déterminée expérimentalement (figure 3). Le point E_C pour lequel la densité de courant totale est nulle ($i_A = -i_K$) est dit **potentiel de corrosion** dans le milieu considéré. La **densité du courant de corrosion** au point E_C est :

$$i_C = i_A = |i_K|$$

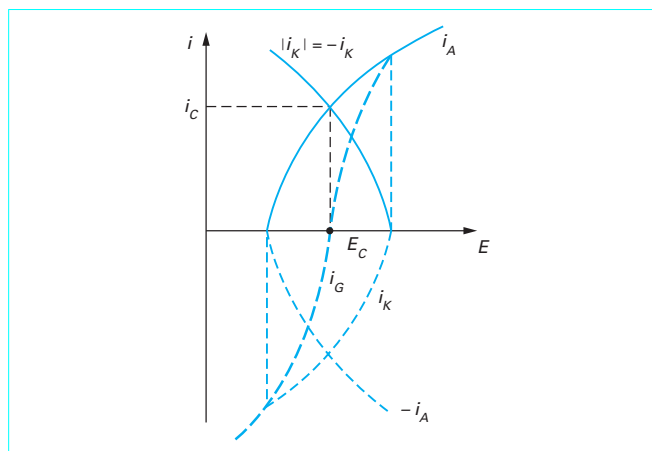


Figure 3 - Courbes individuelles $i_A = f(E)$ et $i_K = g(E)$ et globale $i = h(E)$ de polarisation en fonction de la différence de potentiel métal-solution E , d'après [34]

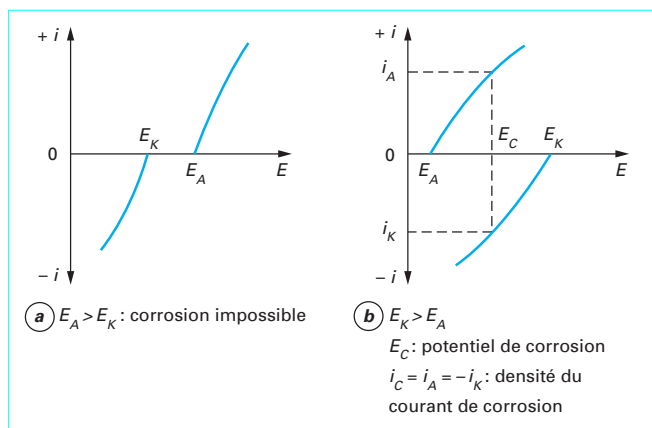
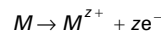


Figure 4 - Courbes de polarisation individuelles de la réaction anodique $i_A = f(E)$ et de la réaction cathodique $i_K = g(E)$

Lorsqu'on s'éloigne du potentiel de corrosion E_C en imposant une différence de potentiel positive $E - E_C > 0$, la réaction de dissolution ou réaction anodique d'oxydation l'emporte et la densité de courant anodique i_A augmente.

Pour certaines caractéristiques de la solution, la courbe de polarisation anodique $i = f(E)$ des alliages métalliques a la forme caractéristique de la figure 5. Elle présente un maximum pour $E = E_p$. Pour $E_{th} < E < E_{pp}$, il y a dissolution selon la réaction :

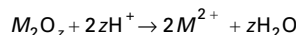


Pour $E_p < E < E_{pp}$; (E_{pp} représentant le **potentiel de passivation**), on observe la réaction :



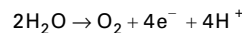
qui se produit simultanément avec la précédente. La formation de l'oxyde M_2O_z freine la dissolution du substrat métallique et on note corrélativement une diminution de la densité de courant.

Pour $E_{pp} < E < E_{tp}$; (E_{tp} représentant le **potentiel de transpassivation**), la densité de courant reste constante, ce qui signifie que l'alliage métallique se passive spontanément dans le milieu considéré. Dans cet état stationnaire, les réactions se déroulant à l'interface *substrat métallique/couche passive* sont identiques aux deux précédentes et à l'interface *couche passive/solution*, la réaction traduisant la dissolution de la couche passive est de type :



Par contre, la **densité de courant résiduel** i_r est très faible, voire négligeable.

Pour $E > E_{tp}$, la densité de courant augmente de nouveau (transpassivité) et il se produit une réaction (oxydation de l'eau) de type :



qui entraîne la destruction de la couche passive. Selon la position relative des courbes élémentaires de polarisation des réactions anodique et cathodique, trois cas peuvent se présenter.

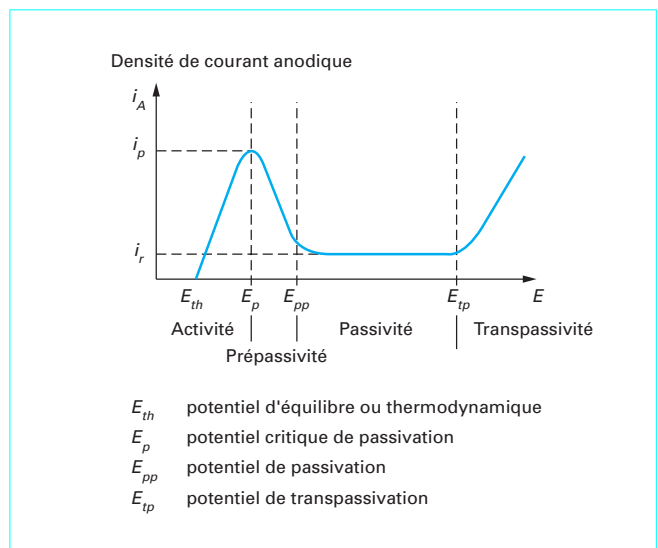


Figure 5 - Courbe anodique de polarisation d'un acier inoxydable en milieu acide (acide sulfurique : H_2SO_4) : $i_A = f(E)$, d'après [34]

Ce document a été délégué pour le compte de 7200034092 - // nc EDITIONS TECHNIQUES INGENIEUR // 217.109.84.129

a) Le **potentiel de corrosion** E_C (figure 6 a), est défini par l'intersection de la courbe anodique et de la courbe cathodique de polarisation. Si le métal est plongé dans la solution, la densité du courant de corrosion est i_C . Dans ce cas, le film passif préalablement formé va être détruit car un état passif stable ne peut être maintenu.

b) Au **potentiel critique de passivation** E_p , la densité du courant cathodique est supérieure à la densité du courant critique de passivation i_p (figure 6 b). Le métal ou l'alliage métallique se passive spontanément (autopassivation) dans le milieu considéré. On est en présence d'un état passif stable. C'est le cas des aciers inoxydables dans un grand nombre de solutions.

c) Le **pouvoir oxydant de la solution** joue également un rôle important. Dans le cas d'un alliage métallique passivable, tel qu'un acier inoxydable (figure 7), l'accroissement de la teneur en oxydant augmente d'abord la densité du courant de corrosion à l'état actif (courbe cathodique K_1), puis la rend négligeable à l'état passif (courbe cathodique K_2). Par contre, si la concentration de l'oxydant augmente encore (courbe cathodique K_3), le point de fonctionnement se trouve dans le **domaine transpassif** et on observe alors une rupture localisée de la couche passive.

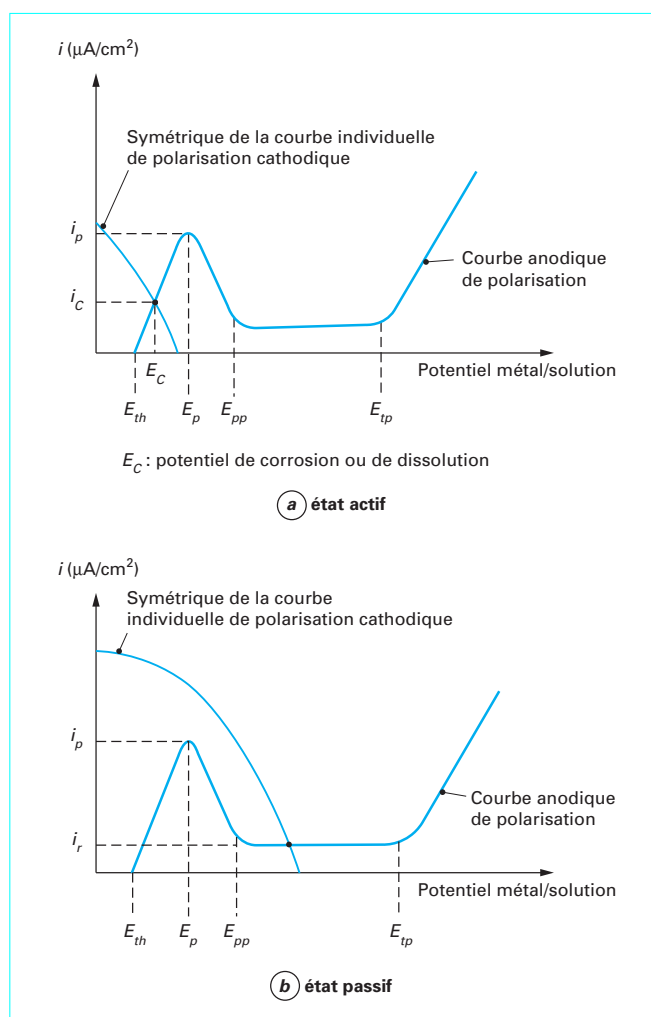


Figure 6 – Points de fonctionnement d'un métal ou d'un alliage métallique

L'interprétation électrochimique du phénomène de corrosion permet notamment d'expliquer la corrosion et la résistance à la **corrosion uniforme** des métaux purs et des alliages métalliques se présentant sous la forme de solutions solides homogènes. En effet, chaque point de la surface métallique joue alternativement le rôle d'anode (corrosion ou dissolution du métal) et le rôle de cathode (réduction de l'espèce oxydante présente dans la solution). L'enlèvement de métal est alors réparti uniformément sur la surface. C'est le phénomène de corrosion uniforme.

En pratique, un alliage métallique n'est pas, en toute rigueur, assimilable à une solution solide homogène. L'alliage métallique présente des hétérogénéités physiques (joints de grains) et chimiques (ségrégations, inclusions et précipités).

Les caractéristiques électrochimiques de ces hétérogénéités, notamment leur potentiel d'équilibre E_A (figure 4), sont différentes de celles du substrat métallique de base. Il s'ensuit la création de piles locales entraînant la formation de microanodes lorsque E_K est supérieur à E_A ($E_K > E_A$) et de microcathodes lorsque E_A est supérieur à E_K ($E_A > E_K$). Les microanodes sont le siège d'une dissolution (anodique) de l'alliage métallique et les microcathodes sont le siège d'une réduction (cathodique) de l'espèce oxydante présente dans la solution. Si les hétérogénéités sont suffisamment petites et quasi uniformément réparties, la corrosion est statistiquement uniforme.

Dans le cas des alliages métalliques industriels, la conception d'un appareil, les conditions de mise en œuvre et de service peuvent donner naissance à des surfaces cathodiques et anodiques de plus ou moins grandes dimensions et engendrer des phénomènes de **corrosion localisée**. L'origine de ces phénomènes peut être multiple. Les phénomènes de **corrosion cavernueuse** résultent le plus souvent de la création d'un espace confiné dès la conception d'un appareil. Les phénomènes de **corrosion sous contrainte** peuvent être évités par un choix judicieux de la nuance d'acier inoxydable en fonction de la solution avec laquelle elle sera en contact. La démarche est similaire en ce qui concerne la **corrosion intergranulaire** qui peut être évitée en s'abstenant de tout traitement thermique dit « sensibilisant » ou, s'il n'est pas possible de s'en affranchir, de choisir un acier inoxydable austénitique à bas carbone ou un acier inoxydable ferritique stabilisé.

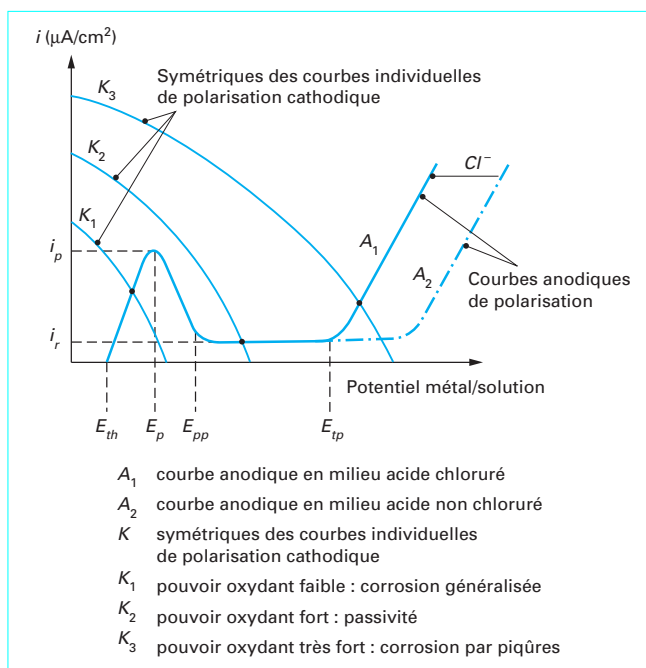


Figure 7 – Points de fonctionnement d'un acier inoxydable en milieu acide chloruré et non chloruré

En conclusion, on peut affirmer que l'interprétation et donc la compréhension des phénomènes de corrosion est grandement facilitée en faisant appel à l'électrochimie. D'autre part, si la composition chimique des alliages métalliques joue un rôle important dans leur aptitude à résister à la corrosion (résistance de la couche passive), leur histoire métallurgique (inclusions, précipités, écrouissage, etc.) joue également un rôle déterminant.

1.3 Résistance à la corrosion uniforme

1.3.1 Généralités

La **corrosion uniforme** constitue la dissolution quasi uniforme de tous les points constitutifs de la surface d'un matériau qui sont attaqués sensiblement à la même vitesse par le milieu corrosif. La conséquence de la corrosion uniforme est une diminution régulière de l'épaisseur par opposition aux différentes formes de corrosion localisée que nous examinerons dans les paragraphes suivants.

La corrosion uniforme se rencontre le plus fréquemment lorsque l'alliage métallique est en contact avec des acides tels que : l'acide sulfurique, l'acide nitrique, l'acide phosphorique, etc.

Avec ce type de corrosion, on peut exprimer la corrosion par la perte de masse m (g) en fonction du temps sous la forme de la relation :

$$m(\text{g}) = A i_C t / zF$$

avec A la masse atomique du métal de valence z ,
 t (en s) le temps,
 F le faraday qui est égal à 96 500 C,
 i_C (en A/cm²) la densité du courant de corrosion,
 m (en g) la perte de masse pour un échantillon dont la surface est de 1 cm².

Si l'on connaît la masse volumique ρ (g/cm³) du matériau, on peut en déduire la réduction d'épaisseur appelée aussi **vitesse de corrosion** Δe (mm/an) par la formule :

$$\Delta e \text{ (mm/an)} = Km / Spt$$

avec K une constante qui avec les unités choisies vaut sensiblement $8,76 \times 10^4$,
 S (en cm²) la surface exposée.

En milieu acide fort, la courbe anodique polarisation a l'allure de celle indiquée à la figure 5. Elle délimite quatre domaines dont l'importance est fondamentale. À gauche du potentiel d'équilibre E_{th} , l'alliage métallique est thermodynamiquement stable et ne se dissout donc pas. C'est le **domaine dit de « stabilité »**. Entre E_{th} et E_p , l'alliage métallique se dissout à une vitesse relativement élevée. Elle peut atteindre plusieurs millimètres par an. C'est le **domaine dit d'« activité »**. Entre E_{pp} et E_{tp} , l'alliage métallique ne se dissout pratiquement pas. Si l'on devait parler de réduction d'épaisseur, elle ne serait que de l'ordre du micromètre par an. Au-delà de E_{tp} , il s'agit du **domaine transpassif** qui n'est à considérer que dans le cas de milieux très oxydants.

Tout l'art de la lutte contre la corrosion sera de choisir un couple **alliage métallique-solution** de manière à ce que la nuance retenue se trouve à l'état passif dans le milieu considéré. Compte tenu de la grande variété des nuances, les aciers inoxydables sont, en général, capables de résoudre ce problème.

Cependant, il faudra que la solution ait un pouvoir oxydant suffisamment élevé pour que le point de fonctionnement représenté par l'intersection de la courbe anodique de polarisation et le symétrique de la courbe individuelle de polarisation cathodique ne se trouve pas dans le domaine actif (figure 6 a) mais dans le domaine passif (figure 6 b).

Enfin, il faut insister sur le fait que, en plus de ces caractéristiques chimiques, les caractéristiques physiques de la solution ou milieu corrosif sont de première importance. En général, l'augmentation de la température est un facteur aggravant. En l'absence de phénomènes d'érosion, de cavitation et d'abrasion, la circulation du fluide corrosif a un effet bénéfique.

1.3.2 Influence des éléments d'alliage

Le premier élément d'alliage à considérer est le **chrome**. C'est lui qui, à une teneur minimale de l'ordre de 11 %, permet la **passivité** (cf. § 1.1). Plus la teneur en chrome est élevée, et plus le **domaine passif** va s'élargir. Dans le même temps, la densité du courant anodique à l'état actif (pic de corrosion) va diminuer. Ceci est obtenu grâce à la présence d'un **film passif** que l'on trouve sous la forme d'oxyde complexe de type $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{O}_3$ et d'hydroxyde $\text{Cr}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ dans le film passif (figure 2).

Le **molybdène** améliore la résistance à la corrosion dans les milieux acides réducteurs ou neutres en renforçant la stabilité de couche passive et en favorisant la repassivation. Plutôt que sous la forme d'oxyde MoO_3 , on admet aujourd'hui que le molybdène agit à l'interface film passif-solution sous la forme d'espèces hydratées complexes de type $\text{H}_4(12 \text{ MoO}_3, \text{SiO}_4) \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

Le **nickel** n'a pas d'influence directe sur la couche passive bien que l'on constate un effet favorable notamment en milieu sulfurique.

Le **cuivre** améliore la résistance à la corrosion en milieu acide grâce à la formation, à la surface de la couche passive, d'un film métallique obtenu à partir des cations Cu^+ et Cu^{2+} passés en solution.

Enfin, le **silicium** peut avoir un effet favorable dans certains milieux acides et fortement oxydants comme l'acide nitrique concentré et l'acide sulfurique concentré chaud. Au sens strict du terme, le silicium ne peut cependant pas être considéré comme un élément d'alliage car sa teneur est toujours limitée dans les aciers inoxydables.

1.3.3 Caractéristiques chimiques principales des solutions corrosives

Elles agissent directement sur la stabilité du film passif et déterminent donc la résistance à la corrosion. Il s'agit principalement du pH et du potentiel d'oxydoréduction qui conditionnent le potentiel métal-solution. En plus des caractéristiques bien connues et dont les effets sont bien maîtrisés, il faut insister sur le rôle de certaines impuretés ou espèces chimiques car même lorsqu'elles ne sont présentes qu'à de faibles teneurs, elles sont de nature à modifier l'équilibre métal-solution. Aux chlorures Cl^- et aux sulfures HS^- souvent cités, il faut ajouter certains ions métalliques (Fe, Ni) qui, dans certaines conditions, sont capables de former des espèces solubles pouvant déstabiliser la couche passive. Ces quelques considérations montrent la nécessité de connaître précisément la composition de la solution corrosive et donc de ne pas se contenter d'une désignation générique. Lorsque la composition chimique précise est connue, deux cas peuvent se présenter. Dans le premier, il s'agit d'une solution « standard » pour laquelle le choix de la nuance d'acier inoxydable peut se faire à l'aide de **tables de corrosion**. Dans le second, la présence d'impuretés interdit d'avoir recours aux tables de corrosion. Il faudra alors utiliser un **système expert** qui, parce qu'il intègre une part d'expérience, permet souvent de trouver le meilleur compromis.

1.3.4 Milieux acides

1.3.4.1 Acide sulfurique (H_2SO_4)

Les solutions à base d'acide sulfurique [31] [35] sont des milieux complexes. Jusqu'à environ 50 % en concentration, le milieu est

plutôt réducteur. Au contraire, au-dessus d'environ 80 %, le milieu devient oxydant. Par ailleurs, son degré d'ionisation présente un maximum à une concentration de l'ordre de 30 % tandis que la solubilité de l'oxygène est minimale à une concentration d'environ 70 %. Ces considérations permettant d'expliquer la très forte agressivité des solutions dont la concentration est comprise entre 30 et 80 %. Les alliages fer-chrome, qu'ils soient martensitiques ou ferritiques, résistent mal aux milieux sulfuriques.

Dans les solutions très concentrées, c'est-à-dire titrant plus de 80 %, on peut utiliser l'acier inoxydable X2CrNi19-11/1.4306. Sa résistance à la corrosion est bonne dans des solutions concentrées à 93 % jusqu'à 40 °C et dans des solutions concentrées à 98 % jusqu'à 70 °C. L'addition de molybdène dans les nuances austénitiques permet d'améliorer significativement la résistance à la corrosion. Les nuances couramment utilisées sont les suivantes (IM 4 540), figure 15) : X2CrNiMo17-12-2/1.4404 et surtout : X2CrNiMo18-15-4/1.4438. Aux températures supérieures à 70 °C, il est recommandé d'utiliser des nuances austénitiques qui, en plus du molybdène, contiennent environ 5 % de silicium.

Dans les solutions intermédiaires, dont la concentration d'acide sulfurique est comprise entre 30 et 80 %, les aciers inoxydables se corrodent rapidement. Par contre, la présence de certaines impuretés oxydantes favorise l'établissement et le maintien de la passivité. C'est le cas des ions cuivriques, de l'acide arsénieux (0,1 % As_2O_3) et de quelques dizaines de p.p.m. d'acide nitrique. En plus du molybdène, des additions de l'ordre de 1,5 % de cuivre améliorent encore la résistance à la corrosion. C'est le cas de la nuance « superausténitique » X1NiCrMoCu25-20-5/1.4539 et de la nuance austéno-ferritique X2CrNiMoCuN25-6-3/1.4507.

Entre 0 et 30 % d'acide sulfurique, les nuances austénitiques ne peuvent être utilisées que si la solution est suffisamment aérée et la température limitée. Par exemple, la nuance X5CrNiMo17-12-2/1.4401 peut être utilisée au contact d'une solution à 25 % d'acide sulfurique à la température de 50 °C. Ses performances sont encore suffisantes à la même température dans une solution à seulement 5 % d'acide sulfurique si elle est aérée en permanence (15 p.p.m. d'oxygène dissous).

1.3.4.2 Acide nitrique (HNO_3)

L'acide nitrique étant un puissant oxydant [31] [35], la résistance à la corrosion des aciers inoxydables sera directement fonction de leur teneur en chrome. Ceci entraîne que, quelle que soit la nuance envisagée (ferritique ou austénitique), il faudra être certain qu'elle n'a pas été sensibilisée par une opération de mise en œuvre. De ce point de vue, l'opération de soudage est la plus risquée. En effet, avec certaines nuances, le soudage peut provoquer une **sensibilisation**, c'est-à-dire la précipitation de carbures de chrome intergranulaires, dont la conséquence est un risque fort de **corrosion intergranulaire ou intercrystalline**.

Avec les solutions contenant jusqu'à 50 % d'acide nitrique et jusqu'à la température d'ébullition, il est possible d'utiliser soit une nuance ferritique à 17 % de chrome à bas carbone et stabilisée de type X3CrTi17/1.4510, soit une nuance austénitique à bas carbone de type X2CrNi18-9/1.4307.

Avec les solutions contenant jusqu'à 70 % d'acide nitrique, il faut recourir à des nuances ferritiques contenant au moins 26 % de chrome. Par contre, les nuances « superferritiques » contenant généralement plusieurs pour-cent de molybdène ne sont pas recommandées. En effet, au contact de ces solutions, le molybdène peut s'oxyder préférentiellement et le risque de former des composés intermétalliques doit être pris en compte. La nuance austénitique contenant 25 % de chrome et 20 % de nickel X8CrNi25-21/1.4845 est utilisable jusqu'à la température d'ébullition. Comme elle n'est pas à bas carbone, il faudra éviter tout phénomène de sensibilisation ou, dans le cas contraire, pratiquer un traitement final d'hypertrempe.

Avec les solutions fortement concentrées, celles contenant plus de 90 % d'acide nitrique ou en présence d'ions de chrome hexavalent ($CrVI$) très oxydants, on observe généralement une corrosion

intergranulaire sur toute la surface du matériau (indépendamment de toute zone sensibilisée et donc de la microstructure du matériau). La meilleure façon de combattre ce type de corrosion est d'utiliser une nuance austénitique à bas carbone contenant environ 4 % de silicium : X1CrNiSi18-15-4/1.4361 en sachant cependant qu'une corrosion uniforme « stricto sensu », un peu supérieure à 0,1 mm/an, ne pourra pas être évitée.

1.3.4.3 Acide phosphorique (H_3PO_4)

Bien que les solutions d'acide phosphorique [31] [35] pures soient peu agressives, les nuances ferritiques X6Cr17/1.4016 et austénitiques X2CrNi18-9/1.4307 n'offrent pas une sécurité suffisante au regard du procédé de fabrication. Alors que la nuance austénitique X2CrNi 18-9 est limitée à des solutions à 30 % de H_3PO_4 , un ajout d'un peu plus de 2 % de molybdène (acier X2CrNiMo17-12-2/1.4404) est satisfaisant dans les solutions très concentrées jusqu'à leur température d'ébullition.

Cependant, le procédé de fabrication le plus courant de l'acide phosphorique est un procédé humide qui consiste à attaquer le matériau brut [phosphate tricalcique : $Ca_3(PO_4)_2$] par l'acide sulfurique entraînant la formation d'acides contaminés par des sulfates, des fluorures et des chlorures. Par contre, la présence d'oxydants tels que Fe^{3+} ou Cu^{2+} est de nature à renforcer la passivité. Compte tenu de l'agressivité des polluants, on utilise soit des nuances ferritiques à bas carbone à teneur élevée en chrome (21 à 30 %), à teneur élevée en molybdène (4 à 8 %) stabilisées, soit des nuances austéno-ferritiques de type X2CrNiMoCu25-6-3/1.4505 ou des nuances « superausténitiques » dérivées de la nuance X1NiCrMoCu25-20-5/1.4539.

Ces dernières considérations ne s'appliquent qu'au processus de fabrication. Pour le stockage et le transport de l'acide phosphorique pur, c'est-à-dire en l'absence de contaminants, la situation est différente.

Dans les solutions bouillantes dont la teneur en H_3PO_4 est limitée à 35 %, on peut cependant utiliser les nuances austénitiques de type X2CrNiMo17-12-2/1.4404 ou mieux X2CrNiMo18-15-4/1.4438. Dans les solutions bouillantes dont la teneur en H_3PO_4 est de l'ordre de 85 %, le nickel améliore significativement la situation en réduisant la vitesse de corrosion d'un facteur 10 lorsqu'on passe d'une nuance austénitique à 12 % de nickel (X2CrNiMo17-12-2/1.4404) à un alliage contenant 62 % de nickel (*alliage 625*).

1.3.4.4 Acide chlorhydrique (HCl)

L'acide chlorhydrique [31], [35] pose un problème spécifique de corrosion uniforme dans la mesure où les courbes de polarisation cathodique sont situées vers les bas potentiels et de ce fait coupent la courbe anodique de polarisation au niveau de son pic d'activité (figure 8). La présence d'oxydants, en particulier d'oxygène, a pour effet de déplacer les courbes de polarisation cathodique vers la droite et d'augmenter la densité du courant de corrosion (figure 8).

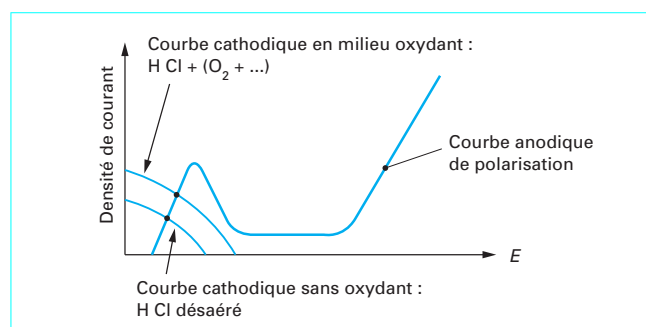


Figure 8 – Corrosion par l'acide chlorhydrique

Par ailleurs, dans ce milieu très agressif, les hétérogénéités métallurgiques, notamment celles pouvant apparaître lors de la mise en œuvre du matériau (soudage), ne sont pas tolérables. C'est pour cette raison qu'il est recommandé d'utiliser des nuances à bas carbone.

Le chrome joue un rôle très favorable puisqu'il va diminuer la hauteur du pic d'activité. Le molybdène et le cuivre jouent également un rôle favorable comme, à un degré moindre, le nickel.

Dans les **solutions désaérées et exemptes d'impuretés**, les nuances de type X2CrNi18-9/1.4307 sont inutilisables quelle que soit la température. Par contre, l'addition de 3,5 % de molybdène, comme dans la nuance X2CrNiMo18-15-4/1.4438, procure une bonne passivité jusqu'à des concentrations de l'ordre de 2 à 3 % à 20 °C et de 1 % à 50 °C. Au-delà de ces concentrations et toujours à la température ambiante, il est nécessaire d'utiliser la nuance X1NiCrMoCu25-20-5/1.4539.

Dans les **solutions aérées** ou en présence d'**oxydants**, la position relative des courbes anodique et cathodique illustre l'accroissement de l'agressivité de la solution. Dans ces conditions, la nuance X1NiCrMoCu25-20-5/1.4539 ne présente plus une résistance à la corrosion suffisante et il est nécessaire de recourir à des alliages de type Inconel parmi lesquels l'« *alliage 625* » contenant 22 % de chrome, 62 % de nickel, 9 % de molybdène et des additions de niobium et de tantalum.

1.3.5 Bases fortes : soude et potasse (NaOH et KOH)

1.3.5.1 Milieux purs

Les solutions de soude et de potasse [31] [35] sont peu corrosives en l'absence d'impuretés jusqu'à 100 °C. Les nuances ferritiques du type X6Cr17/1.4016 et X6CrMo17-1/1.4113 sont utilisables respectivement jusqu'à 50 et 70 °C et la nuance austénitique X2CrNi18-9/1.4307 jusqu'à 90 °C. Aux températures plus élevées, les nuances austénitiques contenant moins de 20 % de chrome ont une vitesse de corrosion de l'ordre de 0,4 mm/an et deviennent sensibles à un phénomène de corrosion sous contrainte. On utilise jusqu'à 150 °C la nuance austénitique X2CrNi25-21/1.4335 ou les nuances austéno-ferritiques X2CrNiMoN25-7-4/1.4410 ou X2CrNiMoCuN25-6-3/1.4507.

1.3.5.2 Milieux pollués par des chlorures et des chlorates

Les solutions industrielles de soude contiennent souvent des chlorures et des chlorates à des teneurs allant de 0,1 à 5 %. En général, cette pollution n'a pas d'influence néfaste sur la corrosion uniforme tant que le niveau de chlorates est faible et ce jusqu'à environ 150 °C. Par contre, cette même pollution accroît significativement le risque de corrosion sous contrainte. La nuance austénitique X2CrNi18-9/1.4307 est, de ce fait, limitée à une température d'emploi de l'ordre de 80 °C. Jusqu'à 140 °C, on peut utiliser des aciers austéno-ferritiques et au-delà il faut avoir recours aux alliages de nickel, voire au nickel pur.

1.3.5.3 Milieux pollués par des sulfures

Dans les principaux procédés de fabrication de la cellulose à partir du bois (procédé Kraft), les copeaux sont attaqués par une lessive à 20 % (en masse) de NaOH contenant du sulfure de sodium (Na_2S), du carbonate de sodium (Na_2CO_3) et du thiosulfate de sodium ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$). Le cycle de fabrication conduit à porter le milieu à des températures variant entre 70 et 170 °C. Dans cette gamme de températures, les aciers austénitiques contenant du nickel et du molybdène ont un comportement général mauvais pouvant être aggravé par un phénomène de corrosion sous contrainte. C'est pour cet ensemble de raisons que l'on utilise, dans ces milieux, des nuances ferritiques à haute teneur en chrome (X2CrMoTi29-4/1.4592) mais également des nuances austéno-ferritiques (X2CrNiMoN25-7-4/1.4410).

1.3.6 Milieux organiques

1.3.6.1 Généralités

D'une manière générale, les acides organiques [31] [35] sont beaucoup moins agressifs que les acides minéraux car ils sont faiblement dissociés en solution. Ils peuvent cependant être agressifs, notamment à haute température et en présence d'ions Cl^- .

1.3.6.2 Acide acétique (CH_3COOH)

Dans l'**acide pur**, le comportement des aciers inoxydables se résume comme suit :

- les aciers ferritiques à 17 % de chrome (X6Cr17/1.4016 et X3CrTi17/1.4510 pour les constructions soudées) sont utilisables à des concentrations inférieures à 25 % ou supérieures à 70 % et à des températures inférieures à 40 °C. L'addition de 2 % de molybdène permet l'utilisation à toutes les concentrations jusqu'à ébullition ;

- les aciers austénitiques X2CrNi18-9/1.4307 sont utilisables à toutes les concentrations jusqu'à 80 °C et jusqu'à une concentration de 20 % à ébullition soit 120 °C. Les nuances austénitiques au molybdène (X2CrNiMo17-12-2/1.4404) résistent jusqu'à l'ébullition pour toutes les concentrations.

Dans l'**acide industriel**, le choix des nuances est plus complexe dans la mesure où selon le procédé de fabrication utilisé, on peut rencontrer des impuretés à des concentrations variables et, parfois, des températures élevées. À des températures comprises entre 120 et 200 °C, il est quasi impératif d'utiliser la nuance : X1NiCrMoCu25-20-5/1.4539 et dans les cas très difficiles, des alliages nickel-molybdène-chrome connus sous le nom générique d' Hastelloy.

Le vinaigre du commerce, fabriqué par fermentation de produits alcooliques naturels, est moins agressif que l'acide acétique. Les aciers martensitiques de coutellerie, contenant 13 à 15 % de chrome et un minimum de 0,20 % de carbone (IM 4 540), figure **12** résistent très bien à l'action du vinaigre dont on se sert d'ailleurs pour contrôler la qualité de la trempe. Les nuances ferritiques et austénitiques résistent, a fortiori, au vinaigre.

Dans certaines fabrications agroalimentaires, pendant lesquelles la température du vinaigre est élevée, et surtout en présence de sel, on utilise alors des aciers austénitiques au molybdène du type X5CrNiMo17-12-2/1.4401.

1.3.6.3 Acide formique (HCOOH)

L'acide formique est plus agressif que l'acide acétique en raison de sa plus forte dissociation lorsqu'il est en solution.

Le comportement des aciers inoxydables peut se résumer de la manière suivante :

- l'acier X2CrNi18-9/1.4307 ne résiste à chaud que dans des solutions fortement diluées (concentrations inférieures à 1 % en volume) ou dans des solutions très concentrées (100 %). Pour les concentrations intermédiaires, il ne résiste qu'à la température ambiante ;

- la nuance austénitique au molybdène (X2CrNiMo17-12-2/1.4404) est utilisable, à toutes les concentrations, jusqu'à 80 °C. L'augmentation de la teneur en molybdène renforce la résistance à la corrosion ;

- l'addition de nickel est défavorable car cet élément forme des complexes solubles à chaud ;

- les aciers ferritiques à haute teneur en chrome et molybdène (X2CrMoTi29-4/1.4592) ont un comportement remarquable. Ils sont parfaitement passifs à plus de 100 °C dans des solutions à 20 % (en volume). La gamme des produits à 29 % de chrome étant restreinte, un bon compromis est obtenu avec la nuance austéno-ferritique : X2CrNiMoCuN25-6-3/1.4507 dont la teneur en nickel est limitée à 6 %.

1.3.6.4 Carbamate d'ammonium et urée ($\text{NH}_2\text{COONH}_4$, NH_2CONH_2)

La fabrication de l'urée, largement utilisée dans les engrais, passe par une première étape qui consiste à réaliser la synthèse du carbamate d'ammonium $\text{NH}_2\text{COONH}_4$ par réaction entre CO_2 et NH_3 sous

forte pression. Dans une seconde étape, le carbamate est transformé en urée NH_2CONH_2 par déshydratation entre 150 et 200 °C.

Le carbamate d'ammonium liquide ainsi que les solutions aqueuses d'urée contenant du carbamate sont extrêmement agressives, d'autant plus que la température est élevée. La synthèse des principales études et de l'expérience acquise permettent de faire le constat suivant :

- l'addition de chrome est très favorable et l'optimum se situe entre 19 et 29 % ;
- le molybdène est également favorable, en particulier pour des teneurs supérieures à 2,5 % ;
- le nickel a un effet défavorable ;
- l'action du cuivre est sujette à controverse.

L'ensemble de ces observations conduit à préconiser des nuances ferritiques à haute teneur en chrome du type X2CrMoTi29-4/1.4592. La gamme des nuances ferritiques étant restreinte, les nuances austénoferritiques du type X2CrNiMo25-7-4/1.4410 constituent un bon compromis.

1.4 Résistance à la corrosion localisée

1.4.1 Résistance à la corrosion par piqûres

1.4.1.1 Généralités

La corrosion par piqûres se produit sur une zone très restreinte de la surface de l'alliage métallique, le reste de cette surface restant protégé par le film passif. On observe une rupture locale de la couche passive et si aucune autoréparation de cette rupture ne se produit ; la propagation d'une « piqûre » peut aller jusqu'à la perforation totale de la pièce métallique (figure 9).

La corrosion par piqûres se caractérise par un rapport très petit entre l'aire de la surface attaquée et celle de la surface non attaquée, et l'une des principales caractéristiques de ce type de corrosion est l'existence d'une valeur critique du potentiel alliage-solution E_{tp} qui correspond à la germination des piqûres.

La corrosion par piqûres se produit principalement dans les milieux neutres chlorurés. Elle peut s'observer dans des eaux de différentes natures : eaux de ville, eaux industrielles et surtout eau de mer. Si les chlorures constituent l'origine principale de la corrosion par piqûres, d'autres espèces agressives peuvent être mises en cause dans ce phénomène. Pour l'essentiel, il s'agit des autres halogénures, mais aussi d'espèces soufrées.

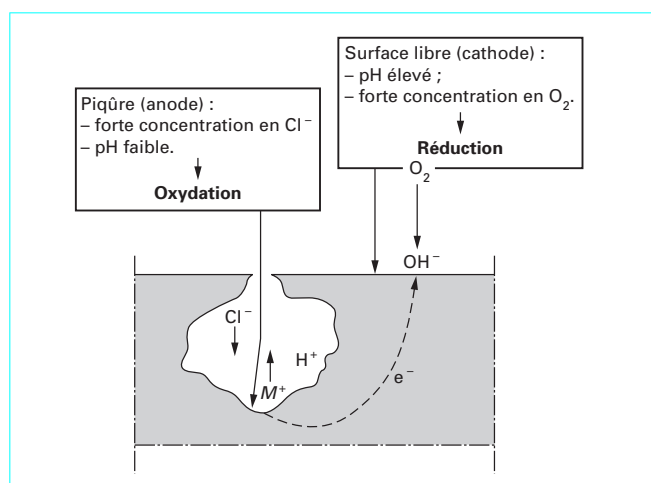


Figure 9 – Propagation d'une piqûre en milieu chloruré

Si l'agressivité du milieu augmente avec la teneur en chlorures ou autres espèces, la température joue également un rôle essentiel par son caractère aggravant.

1.4.1.2 Potentiel de piqûre

Étant donné un alliage métallique caractérisé par sa composition chimique, sa structure métallurgique et son état de surface, et un milieu corrosif déterminé par sa composition chimique et sa température, on observe (si le phénomène peut se produire) l'apparition de piqûres lorsque le potentiel métal/solution dépasse une valeur critique E_{piq} dite **potentiel de piqûre** et qui correspond sensiblement au potentiel de transpassivation E_{tp} défini précédemment (figures 5 et 7).

La courbe de polarisation en milieu neutre chloruré présente l'allure schématisée à la figure 10. Si à l'aide d'une méthode potentiocinétique à faible vitesse de balayage, on suit l'évolution de la densité du courant $i = f(E)$ en fonction de différents potentiels appliqués E , on observe que, au voisinage du potentiel E_{piq} , la densité du courant i augmente brusquement. Cette brusque augmentation est généralement précédée d'instabilités liées à l'apparition de piqûres qui se repassivent après dissolution de certaines inclusions.

En milieu réel, des piqûres stables se développent si le point d'intersection des courbes cathodique (courbe K_1) et anodique se situe à un potentiel E_1 supérieur à E_{piq} ($E_1 > E_{piq}$) appelé aussi potentiel de germination de piqûre. Si au contraire le point d'intersection se situe à un potentiel E_2 inférieur à E_{piq} ($E_2 < E_{piq}$), on est en présence d'une passivité stable (courbe K_2).

La courbe « retour » (R), obtenue en inversant le sens de balayage en potentiel à partir d'un point arbitraire F de la courbe anodique, $i = f(E)$ permet de déterminer le **potentiel de protection** E_{pr} ou potentiel de repassivation, c'est-à-dire le potentiel en dessous duquel il faut redescendre pour repasser la piqûre. Le potentiel de piqûre est donc bien un critère pour apprécier la résistance à la corrosion par piqûres d'un acier inoxydable. Le domaine d'utilisation de la nuance sera d'autant plus large que le potentiel de piqûre sera plus élevé.

Le potentiel de piqûre diminue lorsque la température augmente et/ou lorsque la concentration en chlorures augmente également. Par ailleurs, une augmentation des teneurs en chrome et molybdène est très favorable pour les nuances ferritiques.

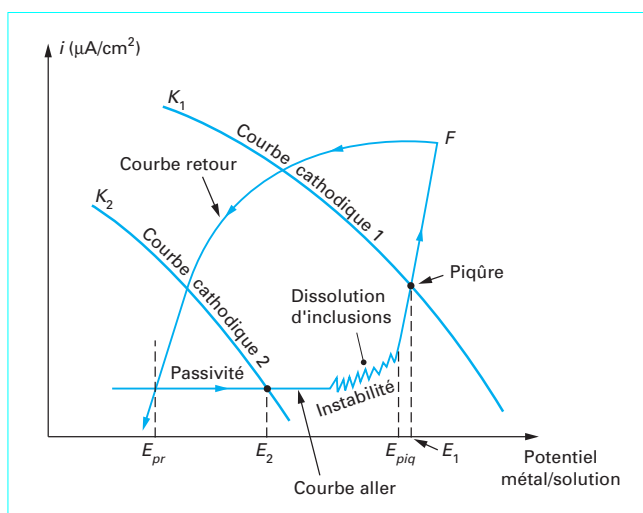


Figure 10 – Courbe potentiocinétique « aller » et « retour » pour un acier inoxydable. Détermination des potentiels de piqûres E_{piq} et de protection E_{pr}

Tableau 1 – Indice de résistance à la corrosion localisée PRE (Pitting Resistance Equivalent) de différents aciers inoxydables ferritiques, austénitiques et austéno-ferritiques

Désignation européenne EN 10088-2		AISI (1) / UNS number(2)	(Éléments en % en masse)						Indice PRE/PREN/PREN W	Structure (3)
Nom	Numéro		Cr	Ni	Mo	Cu	W	Autres		
X2CrMoTi18-2	1.4521	444/S44400	18	.....	2	.....	.....	Ti, Nb	25	α
		26-1/S44627	26	.....	1	0,2	.....	Nb	29	α
X2CrMoTi29-4	1.4592	29-4C/S44735	29	.....	4	.....	.....	Ti, Nb	42	α
		29-4-2/S44800	29	2	4	0,15	.....	.....	42	α
X2CrNiMo17-12-2	1.4404	316L/S31603	17	12	2,2	.....	.....	.....	25	γ
X2CrNiMo18-15-4	1.4438	317L/S31703	19	13	3,2	.....	.....	.....	30	γ
X1NiCrMoCuN25-20-5	1.4539	904 L/NO8904	20	25	4,5	1,5	.....	.....	35	γ
X1CrNiMoCuN20-18-7	1.4547	S31254	20	18	6	0,75	.....	N = 0,2	43	γ
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	2205/S31803	22	5	3	.....	.....	N = 0,15	34	α + γ
X2CrNiN23-4	1.4362	2304/S32304	23	4	.....	.....	.....	N = 0,1	25	α + γ
X2CrNiMoN25-7-4	1.4410	2507/S32750	25	7	4	.....	.....	N = 0,25	42	α + γ

(1) American Iron and Steel Institute
 (2) Unified Numbering System
 (3) α : ferritique - γ : austénitique - α + γ : austéno-ferritique

À l'effet favorable du chrome et du molybdène, il faut ajouter celui de l'azote pour les nuances austénitiques et austéno-ferritiques. C'est pour quantifier cet effet que l'on a développé la notion d'**indice de résistance à la corrosion localisée par piqûre** : PRE (*Pitting Resistance Equivalent*) (tableau 1). Cet indice est défini :

— pour les **nuances ferritiques** par :

$$PRE = \% Cr + 3,3 \times \% Mo$$

— pour les **nuances austénitiques et austéno-ferritiques** par :

$$PRE \text{ (ou PREN)} = \% Cr + 3,3 \times \% Mo + K \times \% N$$

— pour les **alliages austénitiques et austéno-ferritiques contenant du tungstène** par :

$$PRE \text{ (ou PREN W)} = \% Cr + 3,3 \times \% Mo + 1,65 \times \% W + K \times \% N$$

avec K un coefficient compris entre 10 et 30, la valeur la plus couramment utilisée étant 16.

L'expérience montre qu'il existe une bonne corrélation entre l'**indice PRE** et le potentiel de piqûres (mV/ECS ou mV/ENH), la relation étant pratiquement linéaire.

Comme le montre le tableau 2, certains éléments mineurs tels que les éléments stabilisants (titane, niobium) et certaines impuretés comme le soufre jouent un rôle important.

Tableau 2 – Potentiels de piqûres de différents aciers inoxydables dans un milieu NaCl (0,02 M) désaéré à 23 °C et à pH 6,6

Nuance d'acier inoxydable		Potentiel de piqûre (mV/ECS)
Nom	Numéro	
X6Cr17	1.4016	290
X3CrTi17	1.4510	400
X5CrNi18-10	1.4301	420
X5CrNiMo17-12-2	1.4401	600

1.4.1.3 Mécanisme de la corrosion par piqûres

Même lorsqu'un acier inoxydable reste résistant à la corrosion uniforme, on peut, dans certaines circonstances, observer une rupture très localisée de la couche passive appelée piqûration.

Comme on l'a déjà indiqué, le phénomène de piqûration est essentiellement fonction de la teneur en ions chlorures et du pouvoir oxydant du milieu environnant et de la composition chimique et de l'état de surface de l'acier inoxydable.

Plusieurs mécanismes liés à la présence d'ions chlorures (Cl⁻) susceptibles d'entraîner une rupture locale de la couche passive provoquent l'amorçage de piqûres. Les principales étapes sont l'adsorption d'ions chlorures sur la couche passive, la pénétration des ions chlorures dans le film passif entraînant la formation de chlorures métalliques de type MCl₃ et l'accélération de la dissolution anodique sous l'action des chlorures métalliques entraînant la rupture du film.

Si une piqûre peut s'initier et se développer, elle est aussi capable de se repassiver dans les premiers stades de son développement grâce au transport hors de la piqûre des espèces agressives telles que les chlorures.

1.4.1.4 Sites d'amorçage des piqûres

L'amorçage des piqûres sur des inclusions non métalliques est probablement la principale cause de corrosion par piqûres des aciers inoxydables. Autrement dit, la propreté inclusionnaire des aciers inoxydables conditionne, pour une grande part, leur aptitude à résister à la piqûration.

Parmi les inclusions, les sulfures de manganèse (MnS) sont les plus nocifs. À la surface des aciers inoxydables, ils sont localement dépassivants et ils possèdent, de plus, une grande solubilité dans l'eau et d'autres milieux réputés peu agressifs. On peut éviter ce phénomène par des ajouts, même en faible quantité, d'un alliage ayant plus d'affinité pour le soufre que le manganèse et dont le sulfure est peu soluble. C'est le cas du titane qui donne naissance au sulfure TiS₂ peu soluble dans les milieux neutres chlorurés. Lorsqu'elle ne peut être évitée, la dissolution du sulfure manganèse va donner naissance à une microcaverne dans laquelle le confinement conduit rapidement à obtenir localement des conditions de pH

et de potentiel telles que des piqûres peuvent se développer. Cette situation est parfaitement illustrée par certaines nuances austénitiques resulfurées dans le but d'en améliorer l'usinabilité.

Alors que la nuance austénitique usuelle X5CrNi18-10/1.4301, dont la teneur en soufre est de l'ordre de 0,007 %, est à l'état passif dans un milieu simulant la sueur humaine (0,5 % NaCl, 0,1 % urée, 0,1 % d'acide lactique, plus une faible quantité de NH₃ pour ajuster le pH à 6,6), son homologue X8CrNi18-9/1.4305 contenant 0,3 % de soufre est à l'état actif dans les mêmes conditions; la densité de courant passant de moins de 1 µA/cm² à plus de 1 mA/cm².

Les oxydes sont en général beaucoup moins solubles que les sulfures. Par contre, ils possèdent un potentiel cathodique qui conduit à favoriser la dissolution de leur voisinage. De plus, les oxydes étant généralement durs, ils peuvent provoquer pendant les opérations de laminage (cycle de fabrication) ou d'emboutissage (mise en œuvre), des décohésions à l'interface matrice/inclusion.

1.4.1.5 Protection contre la corrosion par piqûre

1.4.1.5.1 Choix de la nuance. Propreté inclusionnaire

Comme cela a été montré dans les paragraphes précédents, les éléments d'addition chrome et molybdène ont une influence très favorable sur la résistance à la piqûration et entraînent une augmentation importante du potentiel de piqûre E_{piq} en bon accord avec la valeur de PRE.

Ainsi la nuance ferritique bistabilisée (Ti, Nb) X2CrMoTi18-2/1.4521, qui a un potentiel de piqûre équivalent à celui de la nuance austénitique X5CrNiMo17-12-2/1.4401, couvre l'essentiel des applications dans les eaux douces froides et chaudes.

Dans les milieux fortement chlorurés, tels que l'eau de mer, la nuance ferritique X2CrMoTi29-4/1.4592, la nuance austénoferritique X2CrNiMoCuN25-6-3/1.4507 et certaines nuances austénitiques fortement alliées du type X1CrNiMoCuN25-25-5/1.4537 ont des performances remarquables.

En plus des éléments d'alliage, il est clair que l'état inclusionnaire du matériau va également jouer un grand rôle notamment sur sa qualité de surface. Aujourd'hui, le procédé d'affinage AOD (*Argon-Oxygen-Decarburization*) permet d'abaisser la teneur en soufre à un niveau de l'ordre de 20 p.p.m., voire moins. Pour diminuer la teneur des autres types d'inclusions, le recours à une opération de métallurgie en poche est souhaitable. Si l'on veut obtenir un métal très propre, c'est-à-dire un alliage métallique dont le potentiel de piqûre serait proche de sa valeur théorique, il faut procéder à une opération de refusion sous laitier électroconducteur (procédé ESR : *Electro Slag Refining*, appelé également procédé Paton).

1.4.1.5.2 Qualité et traitement de surface

Tout traitement renforçant la résistance de la couche passive, tel qu'une passivation à l'acide nitrique, joue un rôle important. On notera également que la passivation nitrique joue un rôle important dans la décontamination, notamment vis-à-vis de particules ferreuses. Ces dernières se comportent comme des sites d'amorçage.

Un traitement par polissage électrolytique est également de nature à renforcer la résistance de la couche passive non seulement parce qu'il va être appliqué à toute la surface d'un objet fini même si sa forme est compliquée, mais aussi parce qu'il va permettre d'éliminer, par dissolution, les inclusions non métalliques de type sulfure.

1.4.2 Résistance à la corrosion caverneuse

Comme son nom l'indique, ce mode de corrosion [37] [38] prend naissance dans des **cavernes** ou des **crevasses** ou des **espaces confinés** dus à la conception des pièces ou des assemblages, ou à la présence de dépôts se formant durant l'utilisation (figure 11).

Une caverne étant une zone confinée, elle est propice à l'accumulation d'espèces chimiques et à l'acidification progressive du milieu conduisant localement à la rupture de la couche passive permettant ainsi la corrosion de l'alliage.

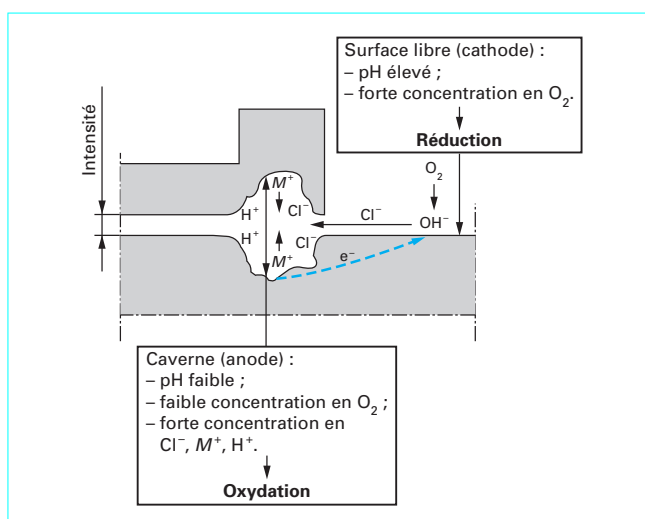


Figure 11 – Corrosion caverneuse dans un milieu chloruré

La corrosion caverneuse se produit dans des milieux chlorurés. La caverne ou zone confinée provoque très localement une modification du milieu et entraîne un changement des paramètres électrochimiques, notamment par un couplage entre l'intérieur et l'extérieur de la crevasse. Comme dans d'autres processus de corrosion, la température joue un rôle aggravant.

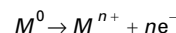
1.4.2.1 Mécanisme de la corrosion caverneuse

La corrosion caverneuse des aciers inoxydables dans des milieux chlorurés ne peut se produire que si le milieu est aéré, c'est-à-dire qu'en présence d'un oxydant ou simplement d'oxygène dissous.

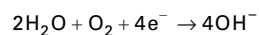
Les trois étapes caractéristiques de la corrosion caverneuse sont :

- une **période d'incubation** pendant laquelle aucune altération du matériau n'est observable. Suivant la sévérité de la caverne, la période d'incubation peut être courte (quelques heures) ou longue (plusieurs mois) ;
- une **période d'amorçage** pendant laquelle le matériau va se corroder rapidement à l'intérieur de la crevasse ;
- une **période de propagation** pendant laquelle la corrosion va se développer jusqu'à l'entrée de la caverne. Elle est le signe d'une ruine prochaine du matériau et donc de l'appareil ou de l'installation.

En dehors de la caverne, c'est-à-dire lorsque l'alliage est à l'état passif, on observe les réactions suivantes. Il existe une réaction anodique de type :

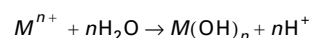


et une réaction cathodique de type :

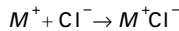


La cinétique de la réaction anodique et celle de la réaction cathodique s'équilibrent, les électrons libérés par la réaction anodique sont consommés par la réaction cathodique. Lorsque l'alliage est à l'état passif, l'intensité de ces réactions est très faible, voire négligeable.

Dans une caverne en milieu chloruré aéré, on observe un épuisement local de l'oxydant insuffisamment renouvelé (ceci vaut pour les oxydants tels que l'oxygène de l'air). Dans un second temps, avec l'épuisement en oxydant, le processus conduit à un enrichissement en ions M^{n+} (Cr^{3+} , Fe^{3+}) à l'intérieur de la crevasse et leur hydrolyse suivant une réaction de type :

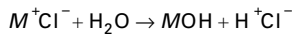


Les échanges vers l'extérieur de la caverne étant limités, la conséquence de cette situation sera un enrichissement en ions H^+ et une diminution progressive du pH de la solution à l'intérieur de la caverne. En présence de chlorures Cl^- et de cations métalliques M^+ des réactions de complexation entre cations métalliques et chlorures, de type :



vont se produire, conduisant à la formation de chlorures métalliques.

Ces derniers, hydrolysés par l'eau, vont former un hydroxyde et libérer de l'acide chlorhydrique suivant la réaction :



Bien que les modèles utilisés, pour décrire les interactions entre cations et chlorures, restent imparfaits car les espèces réellement formées sont plus complexes, la corrosion cavernueuse se caractérise, à l'intérieur d'un espace confiné, par une acidification et par une augmentation de la concentration en chlorures. L'augmentation de la température est, par ailleurs, un facteur aggravant.

1.4.2.2 pH de dépassivation

Le mécanisme qui vient d'être décrit conduisant à l'acidification progressive du milieu à l'intérieur de la caverne, il existe une valeur de pH en dessous de laquelle il y a rupture de la passivité. Cette valeur est appelée pH de dépassivation et elle est notée pH_d .

Le pH_d est généralement déterminé en traçant les courbes de polarisation $i = f(E)$ dans des milieux désaérés riches en chlorures (par exemple : NaCl(2M)). On fait artificiellement varier le pH de la solution et, pour chaque valeur de ce dernier, on mesure la densité de courant d'activité maximale i_p . On obtient ainsi un ensemble de courbes telles que celles schématisées sur la figure 12 et desquelles on déduit la fonction $i_p = g(pH)$ où i_p est la densité maximale de courant d'une courbe $i = f(E)$. Il est possible de séparer les courbes $i = f(E)$ correspondant à un état passif et les courbes $i = f(E)$ correspondant à un état actif. De cette manière, on obtient deux courbes $i_p = g(pH)$ représentatives de ces deux états. Leur intersection définit le pH de dépassivation pH_d (figure 13).

Le tableau 3 donne les valeurs de pH_d obtenues pour quelques nuances représentatives des familles ferritiques et austénitiques.

L'utilisation du pH de dépassivation, pH_d , pour caractériser la résistance à la corrosion cavernueuse, bien qu'imparfaite, permet d'établir une hiérarchie des nuances vis-à-vis de ce type de corrosion. En effet, les pH atteints dans une caverne sont d'autant plus bas que l'alliage contient des teneurs élevées en chrome et en molybdène. Comme le montre la figure 14, il existe une relation quasi linéaire entre le pH_d et la teneur en molybdène de la nuance.

Nuance d'acier inoxydable		pH_d
Nom	Numéro	
X6Cr 17	1.4016	3,0
X6CrMo 17-1	1.4113	2,4
X2CrMoTi 18-2	1.4521	1,8
X5CrNi 18-10	1.4301	2,1
X5CrNiMo 17-12-2	1.4401	1,8
X2CrMoTi 29-4	1.4592	1,1
X1NiCrMoCu 25-20-5	1.4539	1,2
X1CrNiMoCuN 25-25-5	1.4537	0,6

1.4.2.3 Prévention et lutte contre la corrosion cavernueuse

La façon la plus efficace de lutter contre la corrosion cavernueuse est, dès la **conception d'un appareil**, d'éviter de créer tout espace confiné. Bien concevoir un appareil en supprimant les interstices est donc primordial. Cela concerne non seulement la conception de fond d'appareils chaudronnés et le raboutage de tubes [17] mais aussi le dudgeonnage de tubes dans les plaques tubulaires d'échangeurs de chaleur.

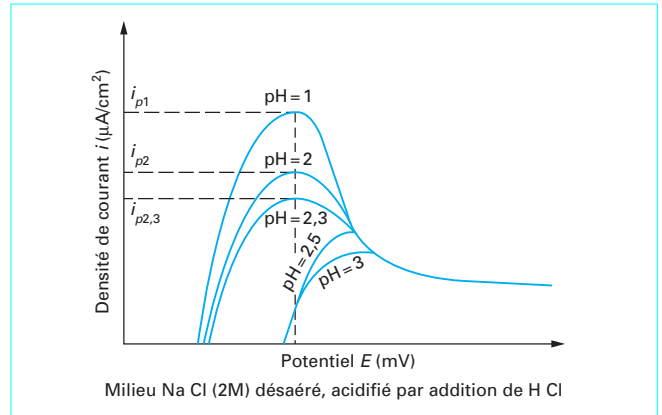


Figure 12 – Courbes de polarisation anodiques $i = f(E)$ pour différents pH, d'après [37]

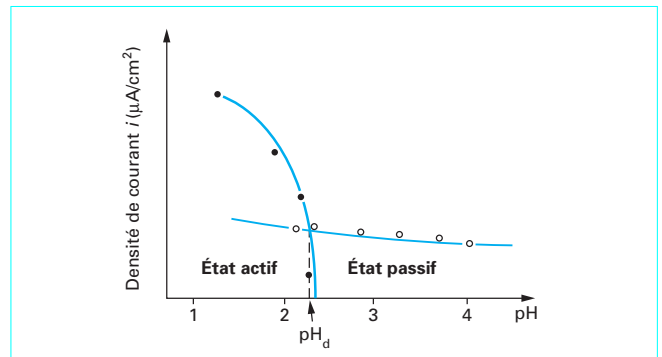


Figure 13 – Détermination du pH de dépassivation pH_d , d'après [37]

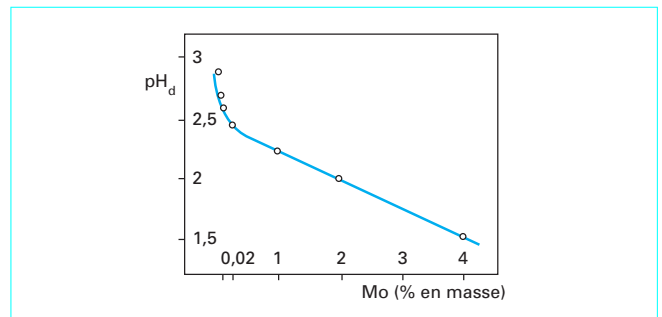


Figure 14 – Influence de la teneur en molybdène sur le pH de dépassivation en milieu NaCl(2M) d'aciers inoxydables contenant 17 à 18 % de chrome, d'après [37]

La mise en œuvre des matériaux devra être soignée et ne pas entraîner une dégradation de leur état de surface. Une attention particulière sera portée aux joints de caoutchouc. On s'assurera d'abord qu'ils ne sont pas susceptibles de relarguer des espèces soufrées ou chlorées et on veillera à leur parfaite adhésion sur la surface métallique.

La conduite des installations est également importante. Il faudra éliminer systématiquement les dépôts solides (tartre notamment) qui peuvent se développer pendant l'utilisation des appareils. Pendant les périodes d'arrêt, il faudra soit vidanger complètement les installations, soit veiller au maintien d'un équilibre hydrodynamique suffisant. Vis-à-vis de la résistance à la corrosion, le choix des alliages est largement influencé par leur teneur en chrome et en molybdène.

1.4.3 Résistance à la corrosion intergranulaire (CIG)

Les joints de grains sont des zones particulières [39] [40]. Elles séparent des grains d'orientation cristallographique différente et constituent, de ce fait, des sites favorables à la précipitation de carbures, de phases intermétalliques ou à la ségrégation d'éléments solutés. Le cas le plus fréquent de corrosion intergranulaire est celui d'un alliage dit « sensibilisé ». Le phénomène de sensibilisation consiste en la précipitation, aux joints de grains, de composés riches en chrome (carbures de chrome $Cr_{23}C_6$). Le carbure de chrome dont la teneur en chrome est très élevée (95 % Cr) appauvrit la matière adjacente en cet élément ; sa teneur en chrome passant sous le seuil de 11 % reconnu comme un minimum pour pouvoir développer une passivité stable (figure 15). Comme l'illustre la figure 16, le système comporte trois zones distinctes :

- le carbure de chrome, grâce à son potentiel noble, sera la cathode (domaine I) ;
- la zone déchromée dont la passivité ne peut plus exister (domaine II) sera l'anode ;
- le cœur du grain dont la teneur en chrome n'a pas été modifiée correspond à l'état de la matrice à l'état recuit (adouci) pour les alliages fer-chrome ou à l'état hypotempéré pour les alliages fer-chrome-nickel (molybdène)-(domaine III).

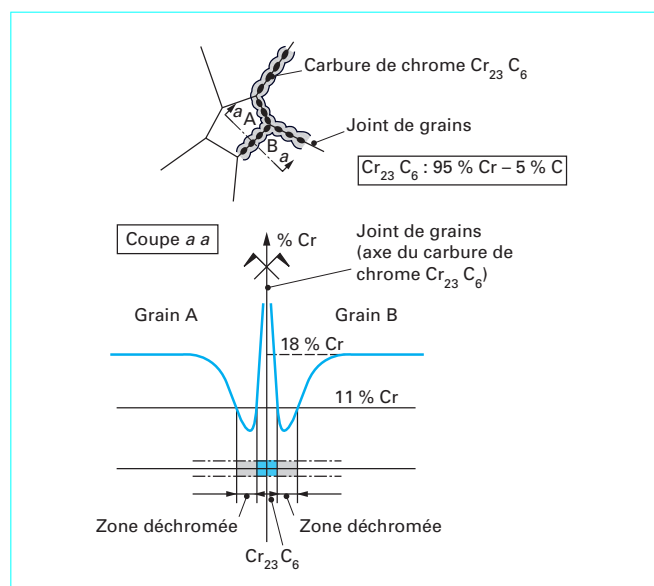


Figure 15 - Représentation de la déchromatisation aux joints de grains par suite de la précipitation de carbures de chrome

1.4.3.1 Aciers inoxydables austénitiques

Les courbes de polarisation $i = f(E)$ des alliages Fe-Cr-Ni montrent très clairement l'influence du chrome sur l'intensité critique du pic d'activité et sur l'étendue du domaine de passivité (figure 17). La sensibilisation de l'acier, c'est-à-dire la précipitation de carbures de chrome $Cr_{23}C_6$ aux joints de grains, est la conséquence d'un chauffage et d'un maintien suffisamment long entre 500 et 800 °C. Elle peut aussi être la conséquence d'un traitement d'hypotempéré (chauffage vers 1 050 °C) suivi d'un refroidissement trop lent. Plus fréquemment, ce phénomène est provoqué par l'opération de soudage dans une zone (ayant atteint une température comprise entre 500 et 800 °C) appelée zone affectée thermiquement (ZAT) ou zone affectée par la chaleur (ZAC). Une température d'utilisation de l'acier anormalement élevée provoquera le même effet de sensibilisation. Ceci a été observé dans le cas d'échangeurs thermiques ou de la gaine de résistances blindées utilisées pour le chauffage de liquides. Dans les deux cas, c'est le tartre qui, agissant comme un isolant thermique, perturbe les échanges entre les deux flux thermiques.

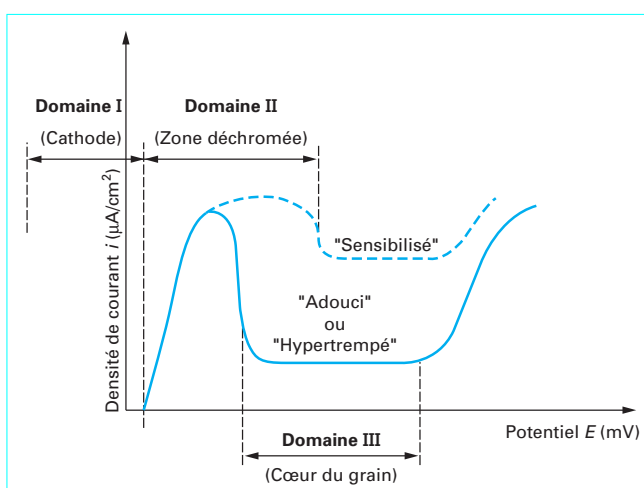


Figure 16 - Comparaison des courbes de polarisation d'une nuance à l'état « non stabilisé » (adouci ou hypotempéré) et à l'état « sensibilisé »

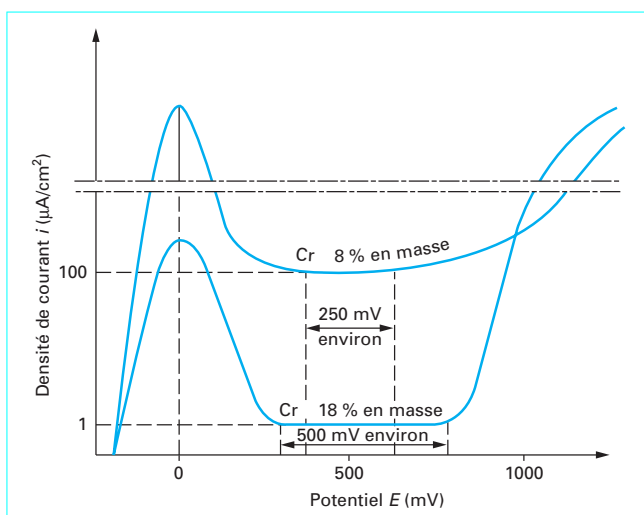


Figure 17 - Influence de la teneur en chrome sur l'allure des courbes de polarisation anodiques $i = f(E)$ de deux alliages Fe-Cr-Ni en milieu sulfurique

Dans tous ces phénomènes de précipitation, le carbone joue un rôle majeur car il influence directement la cinétique de précipitation des carbures. La précipitation des carbures Cr_{23}C_6 comporte une phase de germination et une phase de croissance liées à l'énergie d'activation du chrome, du carbone, du nickel et du fer. Pour un alliage austénitique contenant 0,05 % de carbone, l'énergie d'activation des éléments Fe, Cr et Ni aux joints de grains est respectivement de 190, 245 et 175 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$.

Le nickel, au contraire du chrome, exerce une action défavorable car il diminue la solubilité du carbone dans la phase γ . Quant à l'azote, il exerce une action favorable en limitant la vitesse de précipitation des carbures de chrome et en favorisant la formation de carbonitrides transgranulaires.

1.4.3.2 Aciers inoxydables ferritiques

Le mécanisme décrit pour les nuances austénitiques n'est pas fondamentalement différent pour les alliages ferritiques. La sensibilisation par précipitation de carbures de chrome se produit principalement entre 500 et 600 °C. Contrairement aux nuances austénitiques, l'azote a un effet défavorable car cet élément précipite sous la forme de nitrures de chrome dont la présence est néfaste vis-à-vis de la résistance à la corrosion.

Enfin, si le métal est chauffé à une température supérieure à 910 °C (opération de soudage), une fraction de la ferrite α va se transformer en austénite γ . Comme le carbone est plus soluble dans l'austénite que dans la ferrite et comme le chrome est plus soluble dans la ferrite que dans l'austénite, on va observer, au refroidissement, la formation de martensite aux joints de grains.

Toutefois, un traitement thermique pratiqué entre 750 et 850 °C permet de réhomogénéiser la distribution du chrome de part et d'autre des joints de grains car sa diffusion est rapide dans la ferrite.

1.4.3.3 Aciers inoxydables austénoferritiques

Grâce à leur structure biphasée formée de ferrite α plus riche en chrome que l'austénite γ et de l'austénite γ plus riche en carbone que la ferrite, la précipitation de carbures de chrome ne pourrait se produire qu'à l'interface α/γ . En fait, la diffusion du chrome étant beaucoup plus grande dans la ferrite, la précipitation de carbures de chrome aux joints de grains proviendrait préférentiellement de la phase ferritique. Compte tenu de cette grande vitesse de diffusion, l'appauvrissement est moins localisé. Le risque de sensibilisation est de ce fait très faible (figure 18). De plus, entre 700 et 850 °C, la précipitation de carbures de type M_{23}C_6 est discontinue et est perturbée par celle de nitrures de chrome Cr_2N . Même si le risque de sensibilisation par précipitation intergranulaire est faible, il n'est pas nul. En cas de doute, il est nécessaire de pratiquer un traitement d'hypertrempe entre 1 050 et 1 150 °C.

1.4.3.4 Aciers inoxydables martensitiques

C'est dans l'intervalle de température de 300 à 550 °C que le risque de sensibilisation est maximal. On y observe en effet la précipitation de carbures : Fe_3C , Cr_2C et surtout M_{23}C_6 à partir de 500 °C. Un traitement thermique à une température supérieure à 700 °C restaure la résistance à la corrosion intergranulaire.

1.4.3.5 Remèdes pour prévenir la corrosion intergranulaire

1.4.3.5.1 Aciers inoxydables austénitiques

L'abaissement de la teneur en carbone à une valeur inférieure à 0,030 % permet de prévenir ce risque dans la plupart des cas. Aujourd'hui cette solution est d'autant plus adaptée qu'il est facile d'obtenir de faibles teneurs en carbone avec les moyens modernes d'élaboration de type AOD. Il existe également une seconde solution qui consiste à utiliser un **stabilisant** c'est-à-dire un élément qui a plus d'affinité pour le carbone que le chrome. Parmi les éléments disponibles : titane, niobium, zirconium, vanadium ou tantale, on

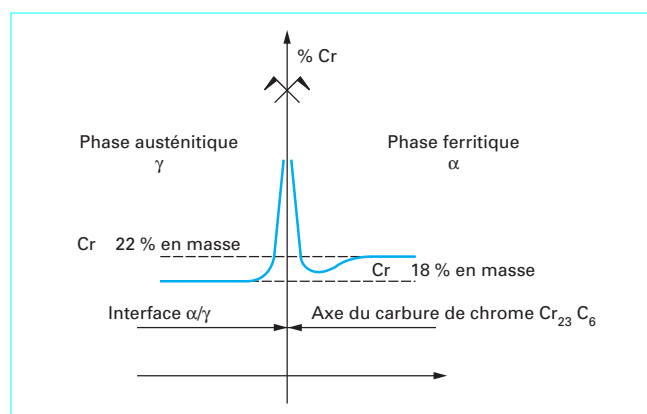


Figure 18 – Représentation de l'absence de déchromisation aux interfaces α/γ par suite de précipitation de carbures de chrome dans le cas d'alliages austénoferritiques

utilise quasi exclusivement le titane et le niobium qui forment, pour le titane, des nitrures TiN et des carbures TiC , et, pour le niobium, des carbonitrides Nb(C,N) . Les formules de stabilisation sont les mêmes que celles données pour les aciers inoxydables ferritiques au paragraphe (§ 1.4.2).

1.4.3.5.2 Aciers inoxydables ferritiques

Les aciers inoxydables ferritiques à 17 % de chrome X6Cr17/1.4016 sont sensibles au phénomène de corrosion intergranulaire. Contrairement à ce qui est réalisé pour les nuances austénitiques, la baisse de la teneur en carbone et en azote ($\text{C} + \text{N}$) à des niveaux très bas n'est pas suffisante pour prévenir ce risque. Dans ces conditions, après avoir baissé la teneur en éléments interstitiels ($\text{C} + \text{N}$) à un niveau de l'ordre de 0,03 %, la solution est l'addition d'éléments stabilisants (Nb, Ti...) à une teneur telle que, au cours des différents traitements que l'on considère en pratique, aucun carbure de chrome entouré d'une zone déchromée ne puisse se former. En fonction de l'élément stabilisant, les formules à appliquer sont celles données au paragraphe 1.4.2. Grâce, en particulier, à leur résistance à la corrosion intergranulaire, les aciers ferritiques stabilisés se sont développés dans différentes applications où le soudage est utilisé comme moyen d'assemblage.

1.4.4 Résistance à la corrosion sous contrainte (CSC)

La **corrosion sous contrainte**, appelée également **corrosion sous tension** [41] [42], est relative à la formation de fissures dues à certains milieux corrosifs. Après une période d'incubation généralement assez longue, les fissures peuvent se propager rapidement et conduisent à la destruction d'un appareil.

Ce phénomène est dû à l'action simultanée d'un milieu corrosif et d'un état de contraintes. L'action conjuguée de ces deux facteurs peut être suffisante pour provoquer localement la rupture de la couche passive (figure 19). La corrosion sous contrainte est donc liée à l'existence même de la passivité. La fissuration peut se produire à partir de microdéfauts de la couche passive lorsqu'elle est soumise à une contrainte de traction. Ce phénomène est très majoritairement observé avec les aciers inoxydables austénitiques.

On doit également noter que le phénomène de corrosion sous contrainte peut être observé dans des milieux peu agressifs (eau chaude) qui, en l'absence d'un champ de contraintes de traction, ne provoqueraient aucune corrosion. Les eaux dont la teneur en chlorures est de l'ordre de 100 p.p.m. et dont la température est supé-

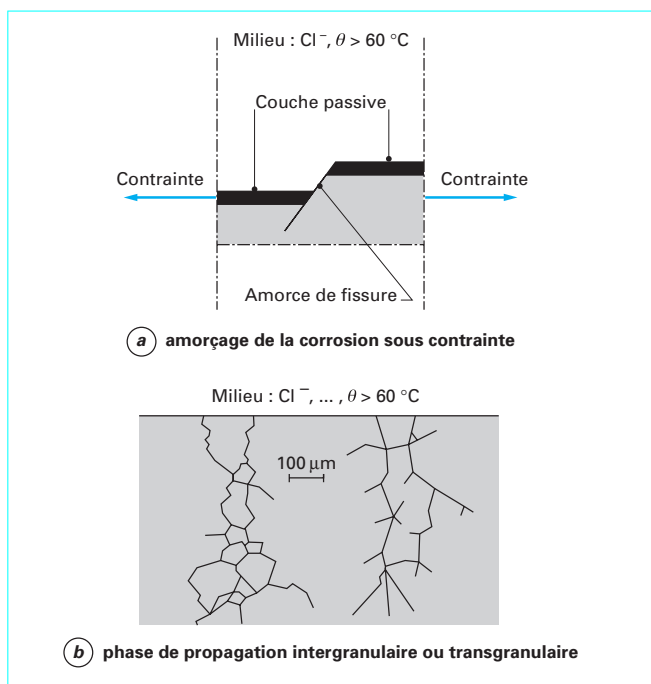


Figure 19 – Représentation de la corrosion sous contrainte

rieure à 60 °C sont susceptibles de provoquer une fissuration dans un alliage de type X2CrNi18-9/1.4307. Les milieux alcalins portés à haute température agissent de manière similaire. D'une manière générale, il faut éviter tout phénomène favorisant la concentration en ions agressifs Cl^- ou OH^- et limiter autant que faire ce peut le niveau de contraintes et la température de service. Par contre, l'acidité du milieu n'a pratiquement pas d'importance pour des pH compris entre 3 et 10.

Dans le mécanisme de corrosion sous contrainte, on distingue deux phases. La phase d'amorçage ou d'incubation est associée à un microfluage qui sera d'autant plus marquée que la limite d'élasticité de l'alliage est basse (aciers inoxydables austénitiques). Le microfluage provoqué par des contraintes inférieures à la limite d'élasticité conventionnelle (à 0,20 % d'allongement) est suffisant pour rompre très localement et à de nombreux endroits la couche passive.

Compte tenu du niveau de contraintes et de la nature du milieu, la repassivation pourra se faire rapidement, à vitesse intermédiaire ou lentement. En fait, le cas le plus critique est le cas intermédiaire car il va permettre l'établissement d'une fissure qui pourra se développer de manière transgranulaire ou intergranulaire.

L'initiation des fissures est, pour un alliage et un milieu donnés, fonction de la contrainte σ appliquée. Il est donc logique d'associer une valeur critique de la contrainte σ_c comme critère de la corrosion sous contrainte.

Comme nous l'avons indiqué précédemment, ce sont les aciers inoxydables austénitiques les plus sensibles au phénomène de corrosion sous contrainte dans les milieux chlorurés. La courbe de la figure 20 montre l'influence de la teneur en nickel d'un alliage à 18 % de chrome sur sa résistance à la corrosion sous contrainte. L'examen de la courbe montre que ce sont les nuances à 8 % de nickel (c'est-à-dire les plus courantes) qui sont les plus sensibles. À partir d'environ 15 % de nickel la durée de vie augmente sensiblement. À une teneur en nickel de 50 %, le risque de corrosion sous contrainte est quasi nul. L'influence favorable d'une teneur élevée en nickel s'explique par le rôle que joue cet élément sur la distribution des dislocations.

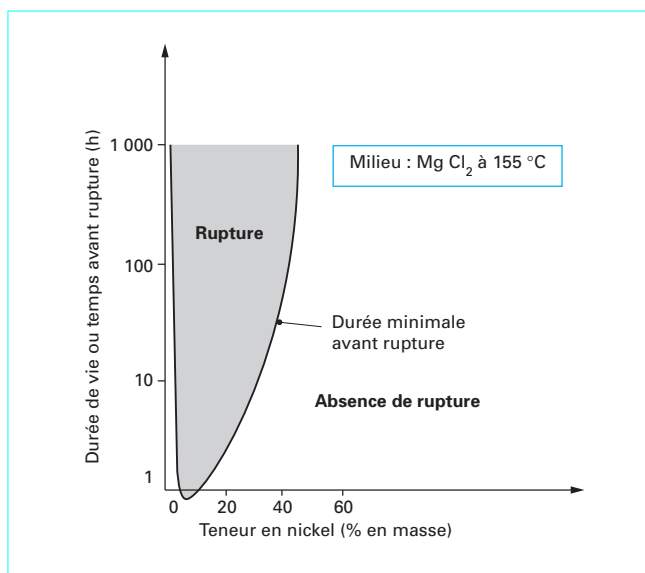


Figure 20 – Influence de la teneur en nickel sur la résistance à la corrosion sous contrainte d'un alliage à 18 % de chrome d'après Copson [43]

Dans les eaux chlorurées contenant environ 100 p.p.m. de Cl^- , portées à des températures comprises entre 150 °C et 200 °C, la contrainte critique σ_c pour les nuances austénitiques est de l'ordre de 100 N/mm² lorsque ces aciers ne contiennent pas de ferrite. Cette valeur est portée à 200 N/mm² lorsque la teneur en ferrite atteint 15 %. Pour les nuances austéno-ferritiques contenant 50 % de ferrite, la contrainte critique σ_c dépasse 400 N/mm².

Les valeurs indiquées ci-dessus montrent que la contrainte critique σ_c dépend fortement de la structure cristalline de l'alliage. Pour les nuances ferritiques qui fluent peu, σ_c est de l'ordre de R_p soit environ 350 N/mm² alors qu'elle n'est que de l'ordre de 100 N/mm² pour les aciers austénitiques courants. Pour ceux dont la teneur en nickel est plus élevée et qui contiennent du molybdène (X2CrNiMo18-14-3/1.4435), on considère généralement que, à l'état non écroui, ils résistent à la corrosion sous contrainte dans les milieux neutres chlorurés.

Pour les aciers austéno-ferritiques, la structure biphasée (50 % de ferrite α et 50 % d'austénite γ) rend le mécanisme plus complexe. Il y a simultanément un effet mécanique dû à la ferrite et un effet électrochimique dû à un couplage entre la ferrite et l'austénite.

L'état des contraintes jouant un rôle important, on imagine aisément que tout gradient de contraintes engendré par une irrégularité de surface va avoir une influence défavorable. Par contre, la mise en précontrainte par un sablage aura un effet favorable. Il s'agit dans ce cas de contraintes de compression qui s'opposent aux contraintes de traction. Ceci n'est vrai que si l'alliage n'est plus déformé après le traitement de sablage.

Bien que les milieux chlorurés soient ceux qui aient fait l'objet de la majorité des études relatives à la corrosion sous contrainte, il existe d'autres milieux à la fois chlorurés et sulfurés encore plus agressifs. Dans ces milieux, même les nuances ferritiques deviennent sensibles à la corrosion sous tension. Le meilleur comportement est obtenu avec les alliages austéno-ferritiques dont la teneur en chrome est d'au moins 25 %.

1.5 Résistance à certains types particuliers de corrosion localisée

1.5.1 Résistance à la corrosion galvanique

On pourra se reporter à la référence [44].

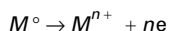
Lorsqu'un métal ou un alliage est immergé dans une solution électrolytique, on peut mesurer son potentiel de dissolution. Pour chaque milieu, il est ainsi possible d'établir la **série galvanique**, c'est-à-dire un classement des différents métaux et alliages métalliques selon le potentiel déterminé expérimentalement.

Le tableau 4 illustre, à titre d'exemple, la série relevée en eau de mer.

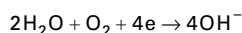
Lors d'un couplage ou liaison électrique entre deux alliages métalliques différents, il s'établit un courant électrique entre eux. Ce phénomène est la conséquence directe de leur différence de potentiel. Il se manifeste dans un milieu électriquement conducteur et a reçu le nom de **corrosion galvanique** ou de **corrosion bimétallique**.

L'examen du tableau 4 suggère, et cela est confirmé par l'expérience, que l'on a un accroissement de la corrosion de l'alliage le moins noble (état actif/domaine anodique) et une diminution, voire une suppression, de la corrosion de l'alliage le plus noble (état passif/domaine cathodique).

La description du couplage électrique s'appuie sur le concept de **potentiel mixte** et prend en compte deux réactions, l'une **anodique** :



et l'autre **cathodique** :



Même si, comme nous l'avons indiqué précédemment, la réalité est plus complexe, le modèle basé sur les réactions anodique et cathodique permet néanmoins de décrire qualitativement le phénomène.

Les principaux facteurs à prendre en considération sont relatifs à l'alliage, au milieu, à l'interface et à la géométrie de la liaison galvanique.

Le milieu joue un rôle direct sur la cinétique du phénomène. Une atmosphère marine est nettement plus agressive qu'une atmosphère rurale. La résistivité du milieu et sa température sont importantes. Dans l'eau de mer qui présente une forte conductivité, l'attaque de l'alliage le moins noble peut se développer au-delà de la zone de contact et conduire à des conséquences moins graves que dans un milieu plus résistif tel qu'en eau douce.

On considère généralement que la corrosion galvanique n'est pas à craindre lors du couplage d'alliages dont la différence de potentiel libre n'excède pas 50 mV dans le milieu considéré. Cela ne s'applique que si les surfaces anodiques et cathodiques sont semblables. Si la surface de l'alliage le moins noble est petite, sa vitesse de dissolution sera élevée. Autrement dit, si le rapport surface anodique S_A sur surface cathodique S_C est faible, la vitesse de dissolution peut être multipliée dans un rapport 100 à 1 000 par rapport au même couple lorsque $S_A/S_C \approx 1$.

D'un point de vue pratique, les organes de liaison mécaniques (rivets, boulons, vis) doivent être plus nobles ou au moins de même nature que l'alliage de base. L'un des cas défavorables souvent rencontrés est celui de rivets en alliage d'aluminium utilisés pour assembler des tôles en acier inoxydable. La corrosion rapide des rivets en alliage d'aluminium compromet non seulement l'intégrité de l'assemblage, mais les produits de corrosion (coulures) donnent un aspect dégradé.

Tableau 4 – Série galvanique de certains métaux et alliages dans l'eau de mer à 20 °C

Sens de la corrosion	Métal ou alliage	E (mV/ECSV) (1)	
↑ Noble ou cathodique	Graphite, platine, or	+ 200	
	Hastelloy C (62 % Ni, 18 % Cr, 18 % Mo)	0	
	Incoloy 825 (42 % Ni, 20 % Cr, 3 % Mo)		
	X5CrNiMo 17-12-2 (passif)	0 à - 100	
	X5CrNi 18-10 (passif)		
	Inconel (80 % Ni, 13 % Cr)-(passif)		
	Cupronickels (60/90 % Cu - 40/10 % Ni)	- 200 à - 300	
	Bronzes (Cu-Sn)		
	Cuivre		
	↓ Actif ou anodique	Étain	- 300 à - 400
		Plomb	
		Brasure (50 % Pb, 50 % Sn)	
		X5CrNiMo 17-12-2 (actif)	- 400 à - 500
X5CrNi 18-10 (actif)			
X12Cr13		- 500 à - 600	
Acier doux, fonte		- 600 à - 800	
Aluminium et alliages		- 800 à - 1000	
Béryllium			
Zinc			
Magnésium			

(1) ECS : électrode au calomel saturé

En milieu marin, la nature des alliages couplés, la composition du milieu (eau de mer ou désaérée), la température, le rapport S_A/S_C ont fait l'objet d'études particulières. Il en ressort que les potentiels libres des alliages évoluent dans le temps. Les aciers inoxydables de type X1NiCrMoCu25-20-5 sont compatibles avec les alliages à base de nickel (*Inconel 625*: 59 % Ni, 22 % Cr, 9 % Mo, 3,5 Nb) et l'alliage de titane TA6V, car le risque de couplage galvanique est quasi nul.

Pour éviter la corrosion galvanique, il existe différentes solutions. Autant que faire se peut, on choisira des alliages proches dans la série galvanique et un rapport $S_A/S_C \approx 1$. Si cela n'est pas possible, comme dans le cas des assemblages mécaniques, l'alliage le plus noble sera choisi pour le rivet ou le boulon. Dans le domaine des aciers inoxydables, le cas des nuances austéno-ferritiques constitue un cas particulier. Dans les milieux très agressifs ou dans ceux conduisant à une acidification locale par hydrolyse de certains sels métalliques, on peut assister par couplage galvanique entre la phase austénitique et la phase ferritique à une dissolution préférentielle de cette dernière.

1.5.2 Résistance à la fatigue-corrosion

On pourra se reporter à la référence [42].

Sous l'influence simultanée de contraintes répétées et d'un milieu corrosif, un mécanisme de fissuration peut se développer. Généralement, les fissures de fatigue s'amorcent et se développent à des niveaux de contrainte inférieurs à la limite d'élasticité du matériau. Si l'on compare la limite de fatigue déterminée dans l'air ambiant et celle déterminée dans un milieu corrosif, on montre que l'alliage, qui se trouvait à l'état passif dans le premier cas, peut se trouver à l'état actif dans le second. Si sous l'effet des contraintes alternées, une couche passive stable ne peut se maintenir sous l'effet de déformations plastiques locales et du milieu environnant, des fissures peuvent s'amorcer et se propager de manière transgranulaire.

Généralement, on définit la résistance à la fatigue-corrosion par le rapport de la contrainte maximale (N/mm^2) ne provoquant pas de rupture dans un milieu corrosif donné sur la valeur correspondante déterminée dans l'air pour un nombre de cycles de l'ordre de 10^7 .

Exemple : une nuance de type X5CrNiMo17-12-2/1.4401 a une limite d'endurance de l'ordre de $290 N/mm^2$ dans l'air pour 10^7 cycles. Dans l'acide acétique, la contrainte correspondante est réduite à $200 N/mm^2$, soit un rapport de l'ordre de 0,7. Dans une eau salée, une nuance austénitique de type X5CrNi18-10/1.4301 voit sa limite d'endurance à 10^9 cycles réduite à $120 N/mm^2$ alors qu'elle était de $240 N/mm^2$ dans l'air [31].

On doit également insister sur l'influence de la fréquence. Lorsqu'elle est faible, le comportement du matériau est proche de celui observé en corrosion sous contrainte. Par contre, aux fréquences élevées, l'influence des phénomènes mécaniques l'emporte. Il est difficile de déterminer une limite d'endurance, notamment sur des éprouvettes lisses, car l'absence d'évolution asymptotique rend quasi impossible toute extrapolation. Ce qui semble maintenant acquis est relatif à l'influence favorable de la résistance à la rupture R_m pour une famille d'alliages.

Exemple : dans un milieu tel que l'eau de mer, on a en effet constaté peu de différence entre les nuances X5CrNi18-10/1.4301 et X5CrNiMo17-12-2/1.4401 sollicitées à 25 Hz ; leur limite d'endurance à 10^8 cycles étant alors de l'ordre de $100 N/mm^2$, alors que pour l'alliage *Inconel 625*, elle serait trois fois plus grande [45].

La modélisation du phénomène de fatigue-corrosion est délicate car elle doit rendre compte de l'équilibre entre l'effet « fatigue » proprement dit et celui de la corrosion sous contrainte. Sans entrer dans les détails des différents mécanismes de propagation, il semble qu'il existe une relation unique entre la vitesse de fissuration dans un milieu corrosif et la vitesse de fissuration dans l'air prise comme référence, mais cette relation n'est pas linéaire.

On peut dire qu'aussi bien les modèles que les essais de simulation ne rendent qu'imparfaitement compte de la situation réelle et que la meilleure réponse est probablement celle que l'on peut tirer de systèmes experts.

1.5.3 Résistance à l'érosion-corrosion et à la cavitation-corrosion

Dans certaines conditions, l'alliage métallique est en contact avec un milieu agressif en mouvement pouvant contenir une seconde phase solide, liquide ou gazeuse. En plus du risque de corrosion au sens électrochimique du terme, s'ajoute une corrosion de type mécanique caractérisée par des interactions entre des particules solides ou des bulles gazeuses et la surface du substrat métallique, créant ainsi un endommagement. L'endommagement mécanique est également influencé par l'existence d'une seconde phase liquide (fluide « diphasique ») non miscible.

Dans le cas d'un fluide monophasique, le mouvement du fluide au contact d'une paroi se traduit par l'existence d'une contrainte de cisaillement τ dont la valeur dépend essentiellement de la géométrie du système et du type d'écoulement. Dans le cas de parois métalliques protégées par un film passif, le cisaillement à la paroi ou scission peut influencer la stabilité de la couche passive. En fait, les contraintes critiques de cisaillement restent faibles et le risque d'endommagement du film passif est limité.

Dans le cas d'un fluide diphasique, l'endommagement de l'alliage métallique est aggravé par l'impact de particules solides (abrasion) ou gazeuses (cavitation). Lorsque la densité de particules est élevée, les interactions entre particules sont importantes et leurs trajectoires deviennent aléatoires.

La conséquence de ce phénomène est une grande dispersion des angles d'impact contre la paroi. Les contraintes correspondantes iront de contraintes normales (σ) à des contraintes de cisaillement (τ). Par ailleurs, l'écoulement du fluide peut provoquer, par un mécanisme d'érosion-corrosion ou de cavitation-corrosion, la formation de cellules galvaniques. La distribution des sites anodiques et cathodiques est généralement fonction de changements hydrodynamiques ; l'écoulement du fluide passant d'un régime laminaire à un régime turbulent.

Exemple : cette situation peut être rencontrée dans le cas de tubulures présentant des changements de section associés à des coudes. La présence d'un milieu chloruré avec des particules en suspension ainsi qu'une température élevée sont des facteurs aggravants.

L'interprétation des phénomènes électrochimiques est possible à partir des courbes de polarisation (figure 21). Dans le cas des aciers inoxydables, à l'état stationnaire (c'est-à-dire sans phénomène d'abrasion ou d'érosion), le couple métal-solution correspond à une passivité stable (point A) grâce à la présence du film passif. Sous l'influence des conditions hydrodynamiques, l'évolution du potentiel peut se faire de A vers B ou de A vers C. Dans le premier cas (évolution $A \leftrightarrow B$), le fonctionnement du système se fait à l'intérieur du domaine passif alors que dans le second (évolution $A \leftrightarrow C$), il s'agit d'un phénomène de dépassivation-activation traduisant une rupture de la couche passive.

On admet donc que le processus érosion-corrosion peut induire des fluctuations de potentiel électrochimique qui sont la résultante de l'effet d'érosion proprement dit et d'un mécanisme de corrosion localisée.

Exemple : cela a été vérifié en milieu sulfurique sur des nuances austénitiques de type X5CrNi18-10/1.4301 après qu'elles aient été sensibilisées. Dans ce cas, assez exceptionnel, le phénomène de corrosion localisée est de type intergranulaire.

La corrosion localisée par piqûres sur des nuances austénitiques à bas carbone de type X2CrNi18-9/1.4307 ne serait observée en milieu neutre chloruré (200 p.p.m. Cl^-) que sur du matériau écroui mettant en évidence le rôle joué par les dislocations.

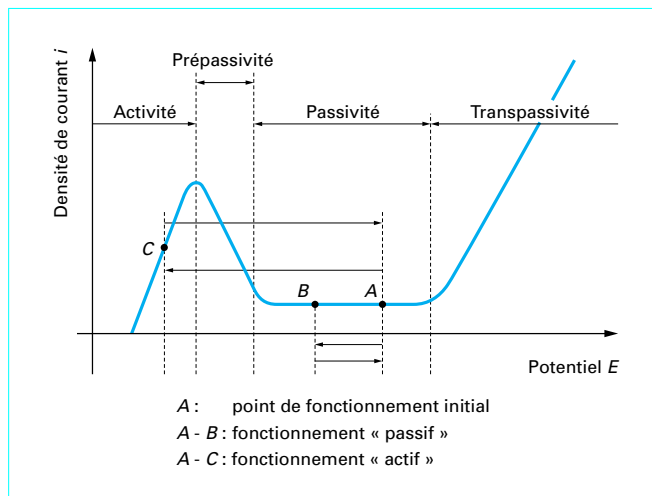


Figure 21 – Courbe anodique de polarisation type illustrant le processus érosion/abrasion-corrosion

D'une manière générale, les aciers inoxydables martensitiques et austénitiques résistent beaucoup mieux que les aciers faiblement alliés aux phénomènes de cavitation. En termes de perte de masse, celle-ci est réduite dans un rapport de l'ordre de 10 dans l'eau à 20 °C si l'on compare un acier inoxydable à 18 % de chrome et 9 % de nickel déposé par soudage à un acier moulé classique.

1.6 Résistance à la corrosion à haute température

1.6.1 Généralités

Le seuil du domaine des hautes températures n'est pas strictement défini mais, généralement, on admet qu'il est de l'ordre de 500 °C. Dans la majorité des cas, l'exposition à haute température d'un acier inoxydable à une atmosphère agressive se traduit par une altération homogène de sa surface. La **vitesse de corrosion** (estimée par la mesure x) de la couche uniforme d'oxydes qui se forme en fonction du temps t est de la forme :

$$x^2 = kt$$

Dans ce cas, la cinétique de formation de la couche :

$$v = dx/dt$$

est de la forme :

$$v = 1/2 (k/x)$$

c'est-à-dire inversement proportionnelle à l'épaisseur de la couche déjà formée.

Dans certains cas beaucoup plus rares, on peut observer un phénomène de corrosion localisée. Aux températures élevées, suivant qu'il s'agisse d'atmosphères oxydantes ou d'atmosphères réductrices, les mécanismes de résistance à la corrosion sont sensiblement différents. Les atmosphères les plus représentatives sont à l'état gazeux, pour les oxydantes [l'oxygène, la vapeur d'eau, le soufre, les oxydes de soufre (SO₂ et SO₃), le dioxyde de carbone (CO₂), les oxydes d'azote (NO_x), le chlore...] et pour les atmosphères réductrices [l'hydrogène, l'hydrogène sulfuré (H₂S), le monoxyde de carbone (CO), les hydrocarbures, l'ammoniac...]. Si le milieu est à l'état liquide, les sels fondus peuvent être soit réducteurs, soit oxydants, et les métaux fondus peuvent être à l'origine de réactions spécifiques par action directe.

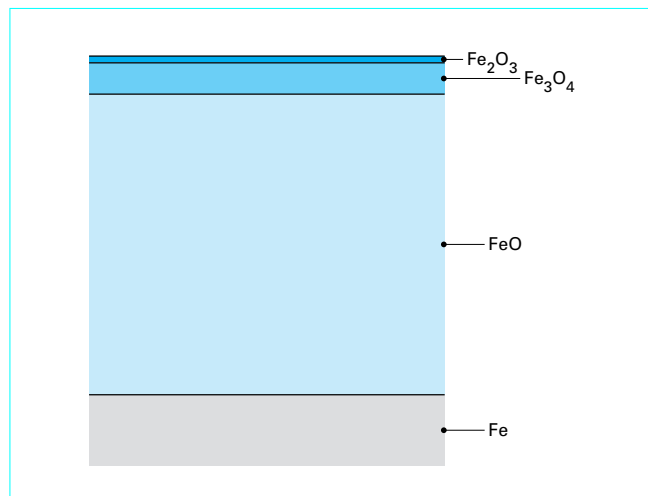
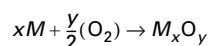


Figure 22 – Représentation schématique de l'oxydation du fer, d'après [52]

1.6.2 Cas des atmosphères oxydantes

La résistance à l'oxydation d'un alliage métallique dépend de la formation d'une couche d'oxydes stables. De plus, cette couche doit être imperméable aussi bien à la pénétration d'atomes, de molécules ou d'ions gazeux du milieu environnant qu'à la diffusion d'ions métalliques en provenance du substrat métallique. La réaction globale de la formation d'un oxyde sur un métal M peut s'écrire :



Cette réaction n'est possible que si la variation d'énergie libre ΔG_{O_2} à la température T est négative. La connaissance de la grandeur thermodynamique ΔG_{O_2} donne une indication sur l'éventualité et le sens de la réaction, mais celle-ci ne pourra se développer que si sa cinétique est suffisamment élevée. La stabilité de l'oxyde formé sera d'autant plus grande que la valeur de ΔG_{O_2} sera négative. Comme l'activité oxygène décroît au fur et à mesure que l'on se dirige vers le substrat métallique, les oxydes se disposent par ordre de stabilité croissante. Dans le cas de l'oxydation du fer pur à des températures supérieures à 575 °C, on observe la formation d'une couche formée de trois oxydes. Ce sont, à partir du substrat métallique, successivement : la wüstite FeO, la magnétite Fe₃O₄ et l'hématite Fe₂O₃ (figure 22). Leur séquence d'apparition, FeO puis Fe₃O₄ et enfin Fe₂O₃, est bien corrélée à celle de l'énergie croissante de formation. L'oxyde le plus « riche » en oxygène Fe₂O₃ se trouve au contact du milieu. La résistance à l'oxydation des alliages fer-chrome, plus complexe, est principalement fonction de leur teneur en chrome. D'une manière similaire à ce qui est observé pour la résistance en milieu aqueux, il existe un effet de seuil à une teneur en chrome de l'ordre de 11 %. En dessous de 11 % de chrome, l'oxyde au contact du substrat métallique est de la chromite Cr₂O₃ se présentant sous la forme d'un film discontinu (figure 23). Ce film discontinu est formé de spinelles FeCr₂O₄ et du wüstite FeO. On retrouve ensuite, comme dans le cas du fer, deux films continus d'oxyde composés de magnétite Fe₃O₄ et d'hématite Fe₂O₃. Dans ces conditions, l'activité oxygène est limitée par la présence du film continu et compact de Cr₂O₃. D'autres éléments tels que le silicium et l'aluminium agissent de manière analogue au chrome.

Ils sont oxydés sélectivement et, de ce fait, sont susceptibles de former un film continu d'Al₂O₃ ou de SiO₂. On augmente encore très significativement la stabilité de la couche d'oxyde par l'addition de faibles quantités d'éléments tel que l'yttrium, dont l'oxyde Y₂O₃ joue un rôle d'ancrage mécanique grâce à un effet intergranulaire

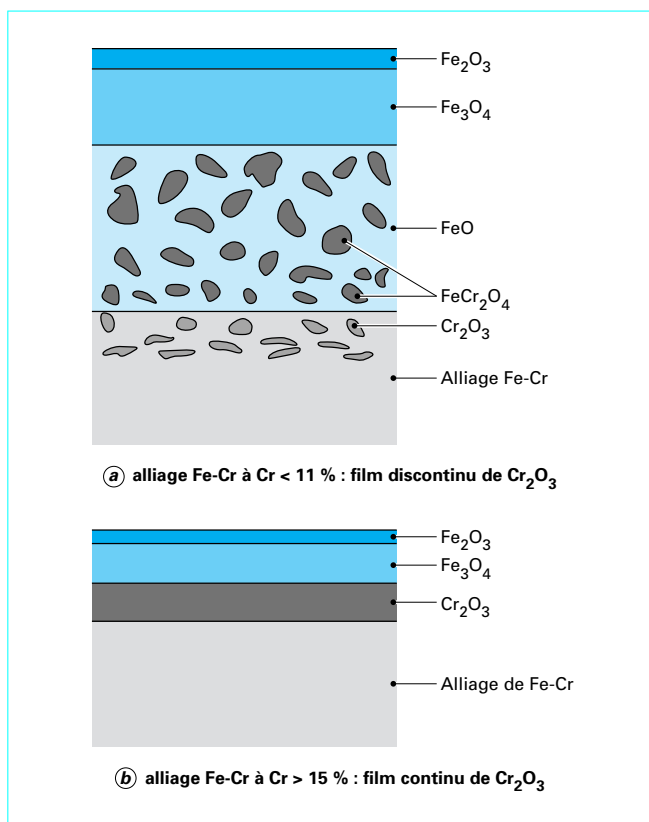


Figure 23 – Influence de la teneur en chrome des alliages Fe-Cr sur la morphologie du film de Cr₂O₃

évitant ainsi l'écaillage de la couche d'alumine Al₂O₃ dont la différence de dilatabilité par rapport au substrat métallique est grande. Le phénomène d'écaillage est ainsi minimisé, surtout si le matériau est soumis à des contraintes cycliques car, dans ce cas, le coefficient de dilatation thermique du matériau a une influence directe sur la stabilité de la couche d'oxyde.

Dans l'air et en régime continu, la limite d'emploi de la nuance austénitique X5CrNi18-10/1.4301 est de 930 °C et celle de la nuance ferritique X2CrTiNb18/1.4509 est de 1 000 °C. En régime cyclique (deux minutes à haute température suivies d'un refroidissement de même durée), l'écart est largement amplifié. La limite d'emploi de ces deux nuances est, dans ces conditions, respectivement de 800 °C et de 960 °C. Toujours en régime cyclique dans l'air, comme le montre la figure 24, les éléments chrome et nickel jouent un rôle essentiel sur la résistance à l'oxydation des alliages austénitiques. La vapeur d'eau joue un rôle spécifique en matière d'oxydation. Si l'oxydation dans l'air est moins importante que dans l'oxygène pur, la situation est inversée en présence de vapeur d'eau. Généralement, on attribue l'effet nocif de la vapeur d'eau par son action sur la porosité de la couche protectrice en favorisant le départ d'espèces riches en chrome. La vitesse d'oxydation en présence de vapeur d'eau est influencée par l'état d'écaillage superficiel de l'alliage. Ainsi, un matériau écroui résiste mieux qu'un alliage à l'état hypere-trempé, car l'écaillage superficiel favorise la formation d'une couche d'oxyde de chrome Cr₂O₃. La corrosion par les gaz contenant du soufre peut être très grave car le soufre tend à former des eutectiques à bas point de fusion (par exemple : NiS à 645 °C). Par contre, le chrome forme un sulfure stable CrS dont la température de fusion est élevée (1 350 °C).

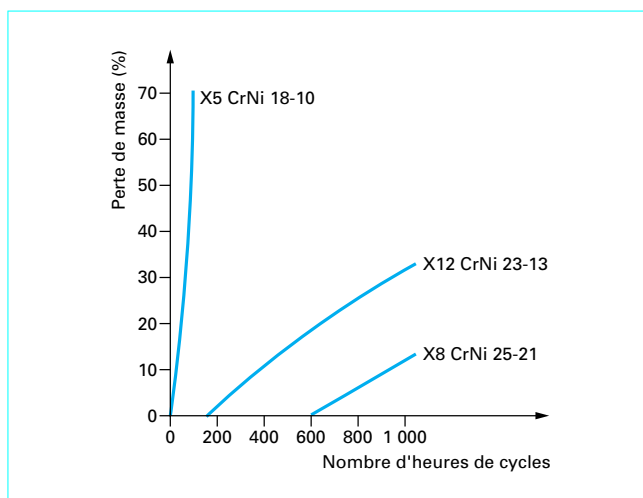
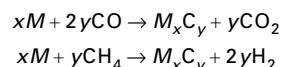


Figure 24 – Influence de la composition chimique (chrome et nickel) sur la résistance à l'oxydation cyclique dans l'air (15 min à 980 °C, 5 min de refroidissement) de nuances austénitiques courantes

1.6.3 Cas des atmosphères réductrices

Les alliages réfractaires peuvent être soumis à l'action d'atmosphères oxydantes, mais également d'atmosphères réductrices contenant du monoxyde de carbone, de l'azote, de l'ammoniac, de l'hydrogène, des hydrocarbures, etc., et dont l'agressivité est fonction de la température.

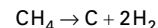
En présence de monoxyde de carbone ou d'hydrocarbures ou plus généralement d'espèces carbonées, les aciers inoxydables peuvent être carburés selon des réactions de type :



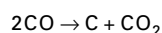
Le carbone ainsi libéré diffuse à l'intérieur de l'alliage et peut précipiter sous la forme de carbures aux joints des grains. Pour ralentir ce phénomène de carburation, le nickel et le silicium sont efficaces. Leur action conjuguée a été quantifiée par la formule :

$$\% Ni + 9 (\% Si).$$

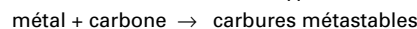
Il existe un mode de corrosion localisée en atmosphère carburante contenant du CO et/ou du CH₄. Il s'agit de la « mise en poudre du métal » (*metal dusting*) suivant un processus complexe qui se manifeste sous la forme de piqûres profondes dont les produits de corrosion sont constitués par du graphite et du métal. En présence de CH₄ le carbone proviendrait de la réaction :



et en présence de CO, la réaction serait :

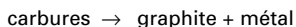


Le carbone ainsi libéré passerait en solution dans une couche mince située à la surface du matériau. Lorsque cette couche serait saturée, on assisterait à une réaction de type :



La croissance de ces carbures métastables serait limitée par un phénomène de taille critique. La réaction devenant instable, on

assisterait à une décomposition rapide des carbures suivant la réaction :



à des températures comprises entre 450 et 800 °C.

Même si cela reste empirique, les alliages dont la composition répond à l'inégalité :

$$\% \text{Cr} + 2 (\% \text{Si}) < 24 \%$$

résisteraient mieux à ce type d'agression.

La **nituration** peut se manifester par interaction entre l'azote obtenu par craquage de l'ammoniac et une surface métallique portée à haute température. L'azote ayant une grande affinité pour le titane, l'aluminium et le chrome, il sera préférentiellement fixé sous la forme de nitrures. Pour renforcer la stabilité de la couche passive, une teneur en nickel supérieure à 35 % est généralement nécessaire. Au-delà d'une teneur en nickel de 80 %, la prise d'azote est quasi nulle. Lorsque la température dépasse 1 000 °C, la dissociation de la molécule d'azote N₂ entraîne une nituration des alliages austénitiques. On observera cependant que dans des atmosphères d'ammoniac craqué, portées à 1 100 °C, l'acier inoxydable contenant 21 % de chrome et 11 % de nickel avec addition de cérium présente une bonne durée de vie. Avec les aciers inoxydables ferritiques dont la teneur en chrome est comprise entre 25 et 30 % et qui contiennent également de l'aluminium et du silicium, la formation de nitrures complexes (Al, Cr, Si) appauvrit la surface du matériau en éléments d'alliage et peut changer complètement sa structure par une transformation de type ferrite → austénite par chauffage puis maintien à 1 200 °C et par une transformation de type austénite → martensite au refroidissement.

Les **atmosphères portées à haute température et contenant de l'hydrogène** ou de ses composés se rencontrent dans de nombreux procédés utilisés dans les industries chimique et pétrochimique. Les principaux d'entre eux sont relatifs à la synthèse de l'ammoniac, à la désulfuration du pétrole et de gaz d'incinération et à certaines opérations en carbochimie et en pétrochimie. Le comportement des aciers inoxydables en présence d'hydrogène est étroitement lié à leur structure cristalline. Si la solubilité de l'hydrogène est beaucoup plus élevée dans l'austénite que dans la ferrite ou la martensite, la situation est inversée en ce qui concerne la diffusibilité. Le tableau 5 résume cette situation à la température ambiante et sous une pression de 1 atmosphère.

Tableau 5 – Solubilité et coefficient de diffusion de l'hydrogène à 25 °C sous 1 atmosphère			
Caractéristiques	Structure α	Structure γ	Rapport α/γ
Solubilité H ₂.....(p.p.m.)	0,74	70,1	10 ⁻²
Coefficient de diffusion.....(cm ² /s)	1, 1 × 10 ⁻⁷	3, 1 × 10 ⁻¹²	3, 5 × 10 ⁴

Il permet d'expliquer pourquoi les nuances à structure ferritique, caractérisées par une faible solubilité et un coefficient de diffusion élevé, sont généralement sensibles à la fragilisation par l'hydrogène. Les aciers austénitiques stables dont la teneur en chrome est de l'ordre de 20 % sont pratiquement insensibles à la fragilisation par l'hydrogène. Par contre, les nuances instables telles que l'acier X2CrNi18-7/1.4318 peuvent être sensibles à ce phénomène, car elles sont susceptibles de former de la martensite d'écroissage, notamment à la suite d'une opération d'emboutissage profond. Le changement rapide d'une structure austénitique (structure γ) à une structure martensitique (structure α) peut conduire à une sursaturation en hydrogène de cette dernière et la rendre fragile. À la manière des aciers inoxydables stables, les aciers inoxydables austénoferritiques offrent une bonne résistance à la fragilisation par l'hydrogène. Cela s'explique par le fait que la phase austénitique de ces alliages est très stable et qu'elle sert de piège à l'hydrogène.

1.7 Essais de tenue à la corrosion

1.7.1 Essais normalisés

Les joints de grains étant considérés comme des zones « particulières », les essais normalisés sont majoritairement des essais pour « mesurer » la résistance à la corrosion intergranulaire des aciers inoxydables. Il faut cependant souligner que ces essais, bien qu'ils soient couramment préconisés et pratiqués, sont éloignés des conditions réelles en service et que, même si leur utilité n'est pas contestable, ils ne peuvent prétendre être des essais de simulation.

Certains aciers inoxydables, notamment les aciers inoxydables ferritiques non stabilisés, sont susceptibles de précipiter des carbures de chrome Cr₂₃C₆ aux joints de grains lorsqu'ils sont soumis à des températures élevées. Dans ces conditions, la zone adjacente au carbure est appauvrie en chrome et se trouve à l'état actif. Le risque de corrosion intergranulaire peut également exister à l'état adouci pour les nuances ferritiques et à l'état hypereffluant pour les nuances austénitiques si les joints des grains sont le siège de ségrégation d'impuretés, notamment celles à base de silicium, de bore, etc. Les trois principaux essais de corrosion intergranulaire, initialement mis au point pour les nuances austénitiques, sont :

- l'**essai de Monypenny-Strauss** (ASTM A 262-98/practice E, NF ISO 3651-2) en milieu acide sulfurique (H₂SO₄)-sulfate de cuivre (CuSO₄) bouillant complété par de l'eau distillée avec des copeaux de cuivre. Il s'applique aux aciers inoxydables, ferritiques, austénitiques et austénoferritiques. L'interprétation de l'essai se fait par examen métallographique de l'échantillon après pliage et aplatissement ;
- l'**essai de Huey** (ASTM A 262-98/practice C, NF ISO 3651-1) en milieu acide nitrique (HNO₃) bouillant. Il s'applique aux aciers inoxydables austénitiques. L'interprétation de l'essai se fait par la mesure de la perte de masse de l'échantillon ;
- l'**essai de Streicher** (ASTM A 262-98/practice B) en milieu acide sulfurique (50 % H₂SO₄)-sulfate ferrique (25-50 g/L Fe₂(SO₄)₃) bouillant. Il s'applique aux aciers inoxydables austénitiques. L'interprétation de l'essai se fait par examen métallographique et/ou par la mesure de la perte de masse.

Les différents essais conventionnels consistent à imposer, par maintien potentiométrique, le potentiel d'un couple redox (Cu²⁺/Cu⁺ pour l'essai Monypenny-Strauss, Cr⁶⁺/Cr³⁺ pour l'essai Huey et Fe³⁺/Fe²⁺ pour l'essai Streicher) (figure 25).

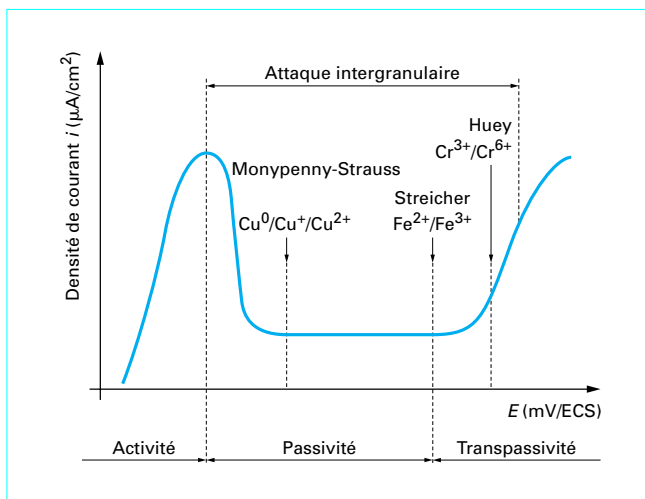


Figure 25 – Signification électrochimique des essais de corrosion intergranulaire. Courbe de polarisation et position des couples redox

L'essai Monypenny-Strauss concerne les milieux peu oxydants. Il consiste à maintenir l'échantillon métallique dans un état se situant à la limite activité/passivité, le potentiel évoluant de 500 mV/ENH à 300 mV/ENH.

L'essai Huey concerne les milieux très oxydants. Dans cet essai, l'échantillon métallique est maintenu dans un état se situant à la limite passivité/transpassivité.

Dans l'essai Streicher, l'échantillon métallique reste à l'état passif. En milieu ferrique, le potentiel peut évoluer de 900 mV/ENH à 700 mV/ENH.

Les essais décrits ci-dessus s'appliquent aux différentes nuances d'acier inoxydable. Il existe cependant des différences notables entre les aciers austénitiques et ferritiques, notamment lors du processus de déchromisation conduisant à précipiter des composés riches en chrome, de type carbure ou nitrure. Le phénomène de déchromisation est cependant très différent dans le cas des aciers inoxydables ferritiques comparé à celui de leurs homologues austénitiques, car la solubilité du carbone et de l'azote est beaucoup plus faible dans la ferrite et, à l'inverse, leur vitesse de diffusion est beaucoup plus élevée.

Les essais Monypenny-Strauss, Huey et Streicher sont d'une mise en œuvre assez lourde et leur interprétation peut être délicate. C'est la raison pour laquelle on a mis au point une méthode électrochimique, connue sous le nom d'**essai EPR (Electro Potentiokinetic Reactivation)**, consistant à effectuer un balayage en potentiel décroissant depuis le domaine transpassif ou passif vers le domaine actif (réactivation). Cette méthode basée sur la courbe « retour », par opposition à la courbe « aller » (courbe classique), est la plus sensible pour mettre en évidence les zones faiblement déchromées. On montre en effet qu'il existe un pic de densité de courant dit de réactivation dont l'aire (figure 26) présente une bonne corrélation avec les déchromisations. Le milieu est constitué par une solution d'acide sulfurique dans laquelle on a ajouté un activateur de type thiocyanate de potassium ou d'ammonium. L'échantillon doit être parfaitement poli puis nettoyé ; la surface exposée étant de l'ordre de 1,5 cm². La température de l'essai est de 30 °C. L'essai proprement dit consiste à charger l'échantillon cathodiquement (potentiel de -600 mV/ECS) puis à faire un saut de -600 mV/ECS à +200 mV/ECS. La vitesse de balayage retour qui permet de tracer la courbe de polarisation « retour » est d'environ 1,7 mV/s. Les points E₁ et E₂ de la courbe permettent de déterminer la zone hachurée qui représente la charge de réactivation.

1.7.2 Essais particuliers de laboratoire

■ Essai d'abrasion en milieu humide

L'échantillon utilisé est généralement un élément de tôle de 50 x 25 mm et de quelques millimètres d'épaisseur (figure 27). L'échantillon, après polissage, est lui-même fixé à l'extrémité d'un arbre dont la vitesse de rotation est fixe (environ 600 tr/min), ce qui permet d'obtenir une gamme de vitesses linéaires allant de 0 à environ 1,7 m/s à l'extrémité de l'échantillon. Le milieu est constitué par une solution plus ou moins agressive (solution de NaCl plus acide doux) dans laquelle sont dispersés de petits morceaux de quartz obtenus par concassage, de manière à avoir des arêtes vives de quelques millimètres de largeur, la taille moyenne étant de l'ordre de 5 mm. L'essai proprement dit comporte cinq périodes d'une heure chacune. À l'issue de chaque période, on procède à la pesée de l'échantillon et au remplacement du milieu. Le résultat est exprimé sous la forme de perte de masse cumulée après chaque période et à la fin de l'essai.

■ Essai de corrosion-abrasion

Cet essai est, sous certains aspects, similaire à l'essai d'abrasion en milieu humide. L'échantillon de tôle de 50 x 20 mm et de quelques millimètres d'épaisseur est fixé, après polissage, dans un arbre vertical muni d'une fente horizontale (figure 28). La vis de serrage

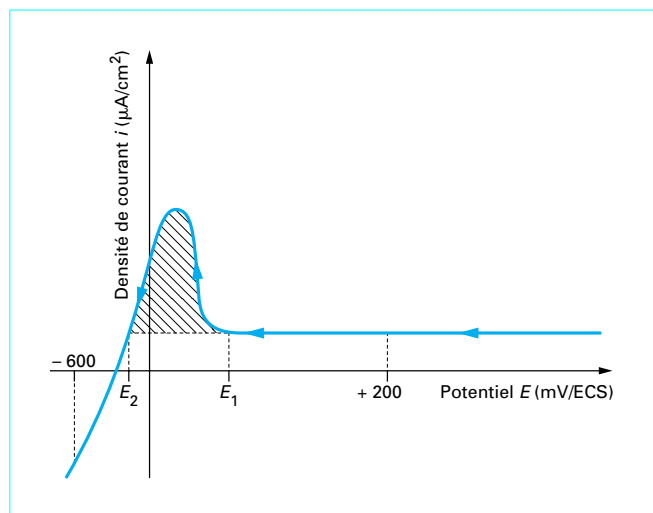


Figure 26 – Signification électrochimique de l'essai EPR. Courbe retour et réactivation

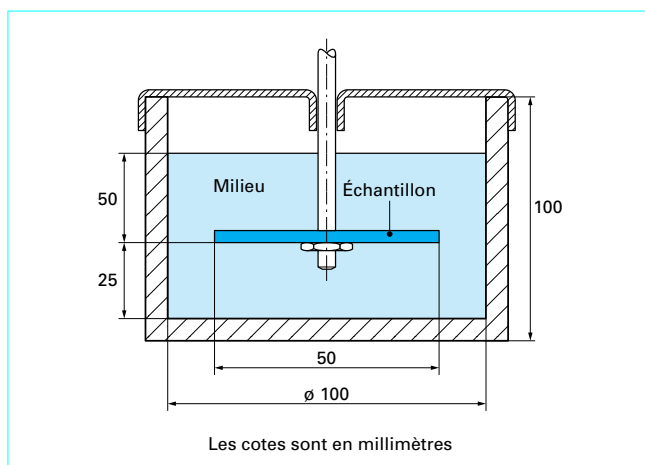


Figure 27 – Dispositif expérimental pour essai d'abrasion humide

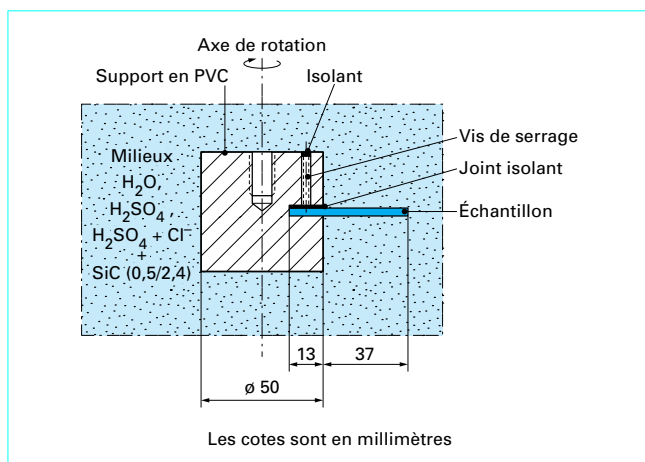


Figure 28 – Dispositif expérimental pour essai de corrosion-abrasion

doit être recouverte d'un vernis isolant afin d'éviter tout risque de couplage. Le milieu est constitué par une solution composée d'eau, d'acide sulfurique (H_2SO_4) avec une teneur en chlorures Cl^- de 500 p.p.m. dans laquelle sont dispersées des particules abrasives de carbures de silicium de trois granulométries différentes (0,5-1,2 et 2,4 mm). La vitesse de rotation de l'arbre est d'environ 200 tr/min, ce qui donne des vitesses linéaires allant de 0,5 à 1,4 m/min à l'extrémité de l'éprouvette. L'essai proprement dit comprend deux périodes de quatre heures. À l'issue de chaque période, les échantillons sont nettoyés puis pesés et le milieu est renouvelé. Le résultat est exprimé sous la forme de perte de masse à la fin de l'essai.

■ Essai de corrosion caverneuse [46]

Il s'agit d'un dispositif expérimental dont le principe est donné à la figure 29. Il est constitué par une lentille de verre appliquée sur l'échantillon métallique à l'aide d'un poids. La zone confinée d'épaisseur variable et donc de sévérité variable est reproductible. On peut y déterminer les paramètres physico-chimiques du milieu, c'est-à-dire : pH, concentration en ions Cl^- et M^+ .

■ Essai de corrosion multipliée [47]

La corrosion par piqûre ayant un caractère probabiliste, on peut soit déterminer l'apparition de la première piqûre, soit considérer l'ensemble des piqûres examinées ensuite par analyse spectrale.

Aujourd'hui, c'est plutôt la première méthode, appelée aussi « multipliée », qui s'est imposée. Elle permet en effet à l'aide du dispositif représenté aux figures 30 et 31 d'effectuer simultanément des mesures sur 12 échantillons et d'effectuer un traitement statistique de la piqûration dans des conditions de rapidité et de fiabilité convenant à un laboratoire industriel.

■ Essai de corrosion sous contrainte

La corrosion sous contrainte peut être assez facilement reproduite en laboratoire, soit dans une solution bouillante de chlorure de magnésium, soit dans une solution bouillante de chlorure de magnésium acidifiée à l'aide d'acide chlorhydrique.

La contrainte peut être obtenue par l'intermédiaire d'un bras de levier à l'extrémité duquel est fixé un poids. Bien que la charge appliquée soit constante, la contrainte augmente au fur et à mesure que les fissures se forment et se développent puisque la section réelle de l'échantillon diminue.

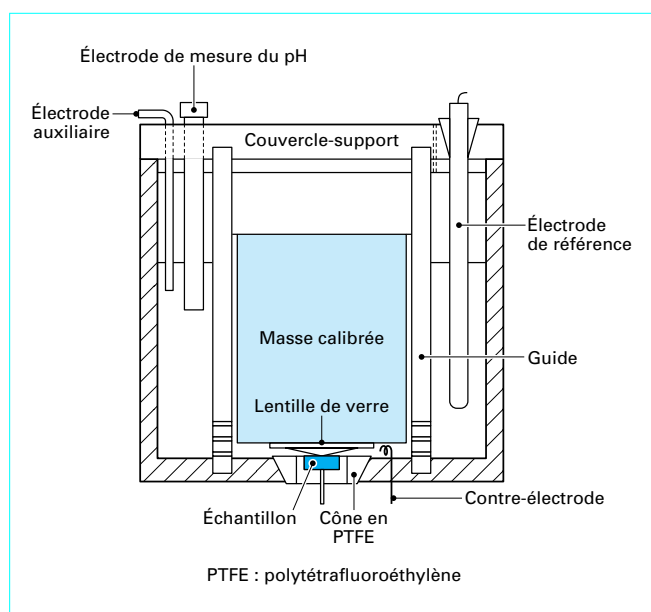


Figure 29 - Cellule d'étude de la corrosion caverneuse, d'après [53]

1.7.3 Études de cas

■ Le premier cas est relatif à une bride en acier inoxydable X2CrNi18-9/1.4307, fixée à un tube de même nuance dans lequel circule de la vapeur à 125 °C sous une pression de 1 bar. Pour assurer une bonne étanchéité et éviter un phénomène de **corrosion caverneuse**, la surface de la bride a été enduite d'un adhésif contenant du chlore. La migration du chlore et les contraintes appliquées ont initié puis développé un processus de corrosion sous contrainte qui s'est manifesté au bout de quelques années. L'utilisation d'un adhésif sans chlore est le remède à ce type de situation.

■ Le deuxième cas concerne la **corrosion par piqûres** d'un tube en acier inoxydable X2CrNiMo17-12-2/1.4404 enterré dans un sol argileux, contenant notamment 600 p.p.m. de chlorures et 1,5 % de fer et dont le pH était de 7,6. Compte tenu du caractère très inhomogène du sol, il est préférable d'enrober le tube d'un revêtement isolant ou, s'il doit rester nu, de remplir la tranchée par du sable non contaminé permettant une aération suffisante.

■ Le troisième cas concerne également un phénomène de **corrosion par piqûres** sur des murs revêtus de X5CrNi18/1.4301. Il s'agit du revêtement mural d'un laboratoire vétérinaire dont l'atmosphère n'est pas agressive. Le protocole de mise en service prévoyait un nettoyage à l'aide d'une solution à base d'acide phosphorique. Le produit réellement utilisé a été une solution dont la teneur en chlorures était de 1 600 p.p.m. et le pH était légèrement inférieur à 1. Le rinçage ayant été imparfait, de nombreuses piqûres se sont développées une semaine après la réception. Cet exemple montre la nécessité de bien respecter les protocoles de mise en service et de toujours faire suivre une opération de nettoyage par un rinçage abondant à l'eau claire.

■ Le quatrième cas est relatif à un tube en X5CrNiMo17-12-2/1.4401 servant au transport d'un gaz chaud (80 °C). L'identification du tube a été faite à l'aide d'un crayon marqueur dont l'encre contenait des chlorures. Après deux ans de service, à l'extérieur du tube des **fissures transgranulaires** se sont développées, sous les repères et ce à l'exclusion de toute autre zone. Cet exemple montre qu'une opération en apparence anodine peut conduire à la mise hors service d'une installation. À l'évidence, il faut utiliser des produits de marquage ne contenant pas de chlorures.

■ Le cinquième cas se réfère à la **corrosion sous contrainte** de tubes en acier inoxydable X2CrNiMo17-12-2/1.4404 qui se sont fissurés en milieu aqueux, contenant des chlorures, porté à la température de 90 °C. Des fissures se sont développées à proximité des soudures circulaires de rabotage des tubes, c'est-à-dire dans la zone où les contraintes résiduelles générées par l'opération de soudage sont les plus importantes. Si l'on ne peut pas contrôler la teneur en chlorures de la solution qui, dans ce cas, était supérieure à 200 p.p.m., il faut pratiquer soit un traitement thermique de détensionnement, soit un traitement d'hypertrempe après avoir réalisé les assemblages.

■ Le dernier cas auquel nous nous référons est celui de réservoirs de stockage cylindriques de grande capacité (1 000 m³ environ) en tôles d'acier inoxydable austénitiques X5CrNi18-10/1.4301 de 6,0 mm d'épaisseur.

Avant mise en service, les réservoirs ont subi un contrôle d'étanchéité en les remplissant d'eau. L'eau utilisée était celle disponible sur le chantier. Les principales caractéristiques étaient : pH = 7, Cl^- = 100 p.p.m., minéralisation = 500 mg/L. Après l'épreuve d'étanchéité, les réservoirs n'ont pas été vidangés et l'eau d'épreuve a stagné pendant plusieurs mois. À l'issue de cette période, des perforations se sont développées à partir de la paroi interne et à proximité et dans les joints soudés. Bien que relativement chargée en ions chlorures, l'eau d'épreuve ne peut expliquer à elle seule l'origine de la corrosion. Ce constat exclut un phénomène de corrosion par piqûres. Par contre, les soudures qui ont été réalisées à l'aide d'électrodes enrobées de type E 308 L présentent de nombreux défauts dont les plus marquants sont des manques de pénétration. Ces manques de pénétration sont en fait des espaces confinés à partir desquels s'est développé un phénomène de **corrosion caverneuse**. Même si l'épreuve d'étanchéité n'a pas été correctement réalisée (nature de l'eau, absence de vidange), c'est la mauvaise qualité des joints soudés qui est à l'origine de ce résultat catastrophique.

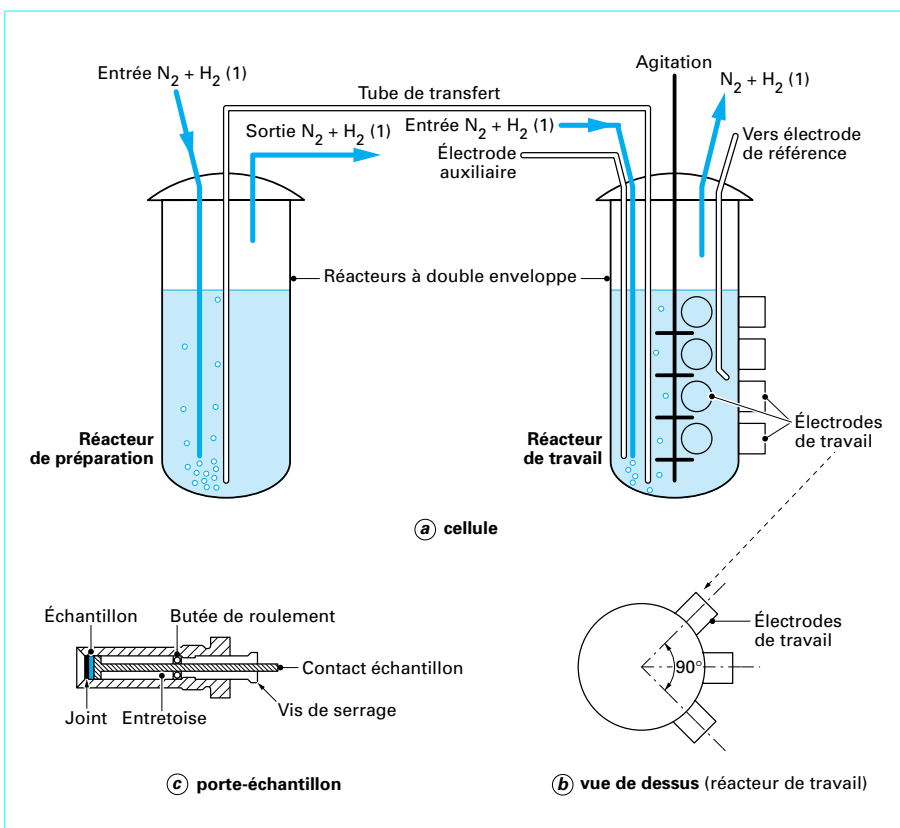


Figure 30 – Cellule électrochimique « multi-pôlure »

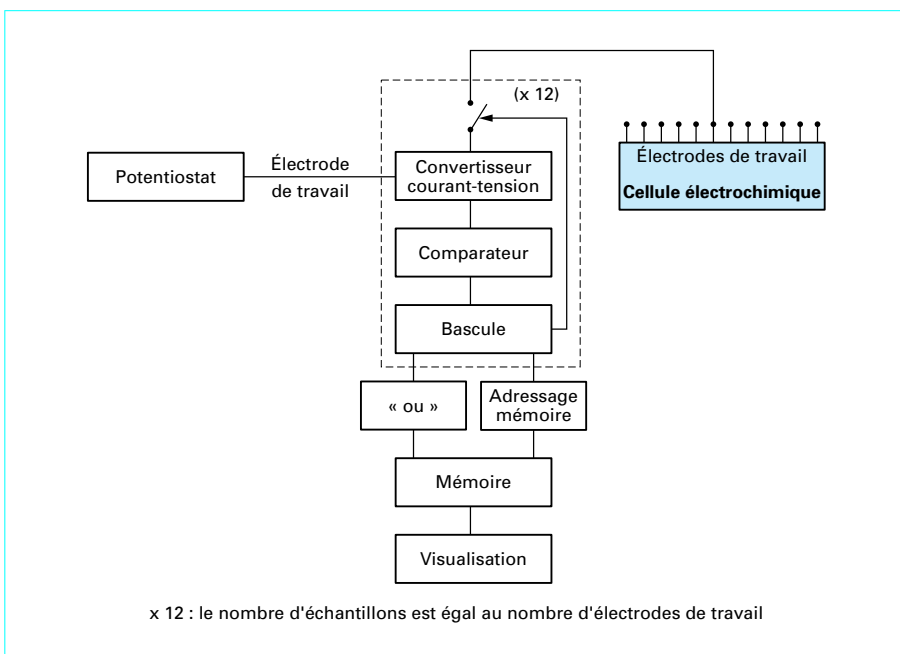


Figure 31 – Dispositif de mesure « multi-pôlure », d'après Baroux et al. [47]

2. Propriétés physiques et caractéristiques mécaniques

2.1 Aciers inoxydables martensitiques

Les aciers inoxydables martensitiques sont pratiquement toujours utilisés à l'état trempé et revenu. Les courbes de la figure 32 donnent l'évolution des caractéristiques mécaniques : R_m (résistance à la rupture en N/mm^2), $R_{p0,2}$ (limite d'élasticité à 0,2 % d'allongement), A (allongement en %) et KCU (résilience Charpy U en daJ/cm^2) de nuances représentatives des différents groupes.

Jusqu'à 300 °C, le traitement de revenu ne modifie pas significativement R_m et $R_{p0,2}$ qui restent quasi constantes. Par contre, on

observe une légère amélioration de l'allongement et de la résilience KCU. Un traitement pratiqué à partir de 550 °C va faire chuter R_m et $R_{p0,2}$ et augmenter de manière significative l'allongement (A) et la ténacité (résilience KCU). Les températures situées entre 350 et 550 °C doivent être évitées car elles provoquent la précipitation de carbures fins de types M_7C_3 , ce qui entraîne une baisse sensible de la ténacité (cf. courbe de résilience KCU) et une augmentation de la dureté (effet de durcissement secondaire).

L'évolution de la dureté en fonction du traitement thermique est généralement donnée sous la forme de courbes :

$$\text{dureté} = f [T(20 + \lg t) \times 10^{-3}]$$

avec T la température (K),

t le temps de maintien (h) ;

le terme $T(20 + \lg t) \times 10^{-3}$ étant connu sous le nom de **paramètre de Larson-Miller**.

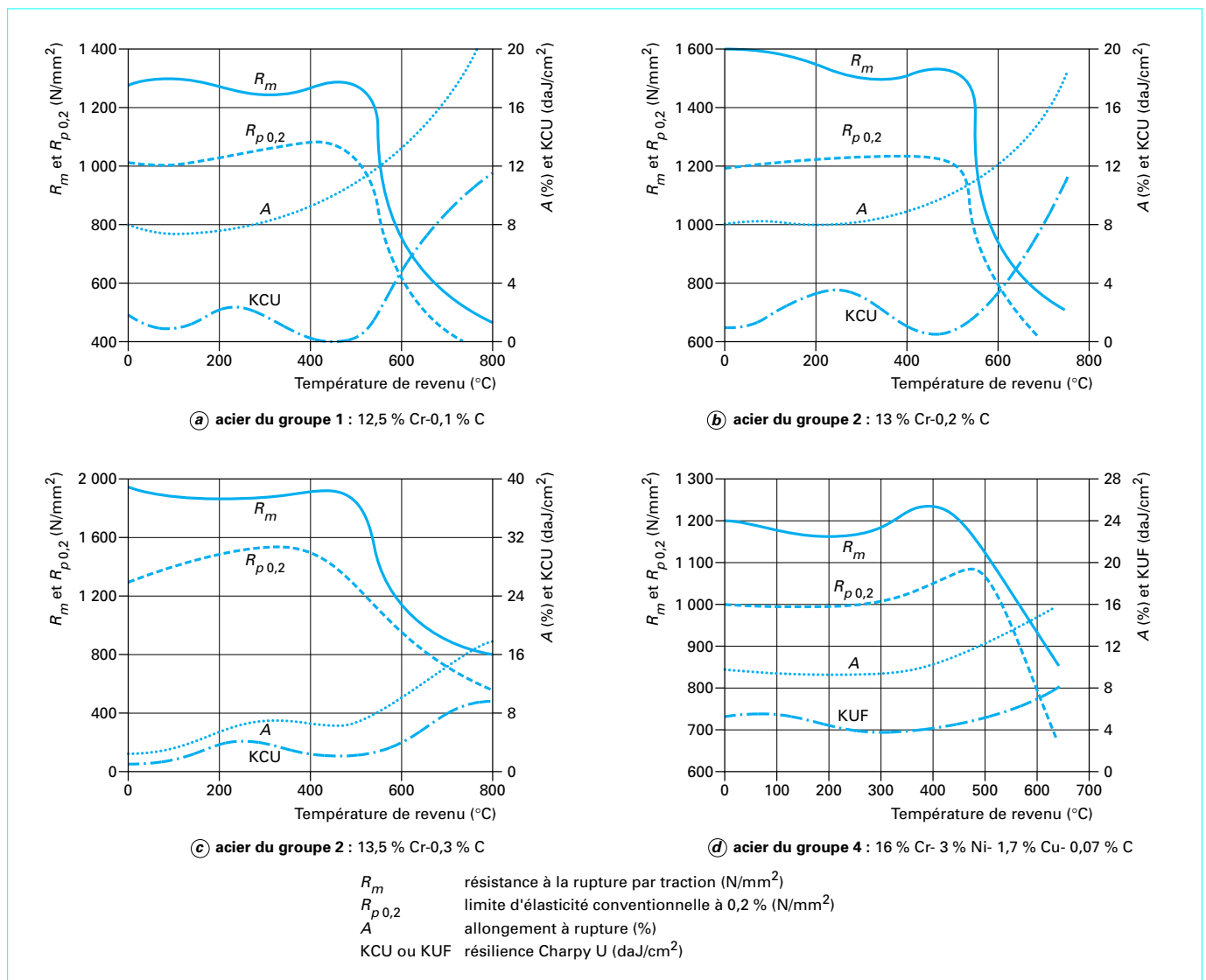


Figure 32 – Caractéristiques mécaniques de différents aciers inoxydables martensitiques pour différentes températures de revenu après trempé à l'huile depuis 1 000 °C

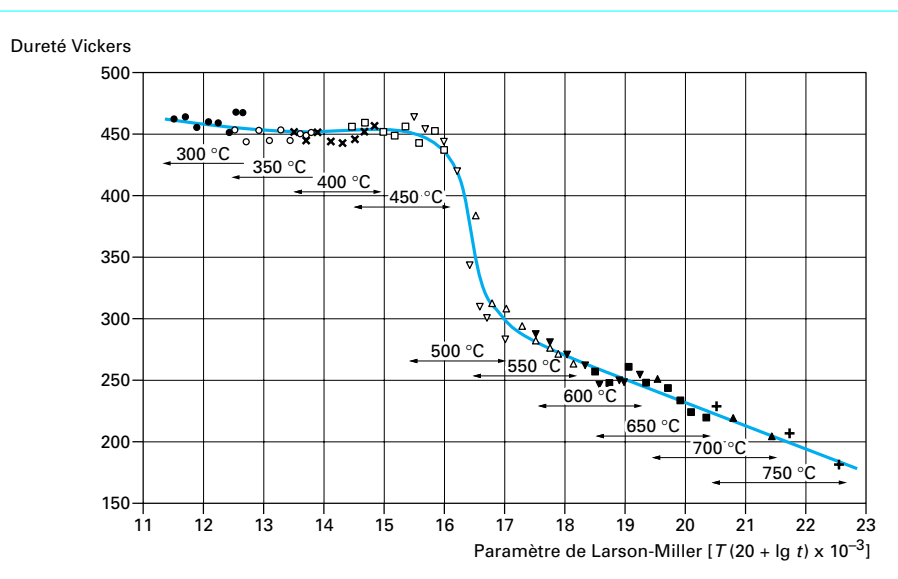


Figure 33 – Revenu d’un acier à 12 % de chrome et à 0,14 % de carbone : évolution de la dureté en fonction du paramètre de Larson-Miller, d’après [18]

La figure 33, empruntée à Irvine et al. [18], illustre cette représentation pour un alliage du groupe 1.

Les traitements thermiques qui viennent d’être décrits ci-dessus correspondent à ceux qui sont pratiqués pour obtenir les caractéristiques finales d’emploi. Cependant, pour réaliser certaines opérations de mise en œuvre, il est peut être nécessaire d’adoucir l’alliage.

Deux traitements thermiques sont couramment utilisés. Le premier, pratiqué à température inférieure à A_{c1} , est en fait un revenu poussé nécessitant généralement un maintien de plusieurs heures. Le second, pratiqué à une température supérieure à A_{c1} , va conduire à une austénitisation (phase γ) partielle ou totale par chauffage entre 900 et 950 °C pendant plusieurs heures. Le chauffage sera suivi d’un refroidissement lent (10 à 20 °C/h). À l’issue de ce traitement, on obtient une structure ferritique plus facile à mettre en œuvre (par exemple par usinage). Lorsque l’opération de mise en œuvre est terminée, il est alors nécessaire de pratiquer le traitement final de type : trempe plus revenu (ou détensionnement).

Les aciers inoxydables martensitiques présentent des propriétés physiques relativement homogènes, elles sont résumées au tableau 6.

Tableau 6 – Principales propriétés physiques des aciers inoxydables martensitiques

Masse volumique	Module d’Young	Coefficient de dilatation linéaire entre 20 et 200 °C	Capacité thermique massique	Résistivité électrique à 20 °C
(kg/dm ³)	(N/mm ²)	(en 10 ⁻⁶ K ⁻¹)	(J.kg ⁻¹ . K ⁻¹)	(μΩ.m)
7,7	215 000	10,5	460	0,55

2.2 Aciers inoxydables ferritiques

Les aciers inoxydables ferritiques sont le plus souvent livrés à l’état adouci, c’est-à-dire après traitement thermique final de recuit entre 800 et 950 °C suivi ou pas d’un *skin-pass* pour les produits plats. Compte tenu de leur équilibre analytique, les aciers inoxydables ferritiques sont caractérisés par l’absence, ou par une forte réduction, de la transformation ferrite ⇌ austénite. De ce fait, ils ne sont pas durcissables par un traitement thermique mais unique-

ment par écrouissage. Leur courbe de traction présente une forte similitude avec celle des aciers doux dont la première partie est une droite (elle représente le domaine élastique) et dont la suite est une partie curviligne (elle représente le domaine plastique). Entre le domaine élastique et le domaine plastique, il existe une zone de transition, caractéristique d’une certaine instabilité qui est représentée par la limite d’élasticité R_p (N/mm²).

Le domaine élastique permet de définir le module d’élasticité ou module d’Young, E_0 (N/mm²), qui est constant tant que l’effort unitaire de traction ne dépasse pas la limite d’élasticité R_p (N/mm²). Le module d’élasticité E_0 est défini à l’intérieur du domaine élastique par la relation :

$$F/S_0 = E_0 \Delta L / L_0$$

avec F la force de traction (N),
 S_0 la section initiale de l’éprouvette (mm²),
 L_0 la distance entre les deux repères placés sur la partie calibrée de l’éprouvette (mm),
 $\Delta L = L - L_0$ l’allongement, en valeur absolue, à l’intérieur du domaine élastique (mm).

Pour les aciers inoxydables ferritiques le module d’élasticité est de l’ordre de 220 000 N/mm². Suivant leur teneur en chrome et leur équilibre analytique en général, les valeurs caractéristiques [résistance à la rupture R_m (N/mm²) et allongement conventionnel A (%)] varient dans de larges proportions. les courbes de la figure 34 résumant la situation pour la nuance à 11 % de chrome X2CrNi12/1.4003 qui est utilisée dans la réalisation de structures soudées et la nuance X6Cr17/1.4016 qui est la nuance de base de la famille de ferritiques. Les autres propriétés physiques des aciers inoxydables sont résumées au tableau 7.

Tableau 7 – Principales propriétés physiques des aciers inoxydables ferritiques

Masse volumique	Module d’Young	Coefficient de dilatation linéaire entre 20 et 200 °C	Capacité thermique massique	Résistivité électrique à 20 °C
(kg/dm ³)	(N/mm ²)	(en 10 ⁻⁶ K ⁻¹)	(J.kg ⁻¹ . K ⁻¹)	(μΩ.m)
7,7	220 000	10	460	0,6

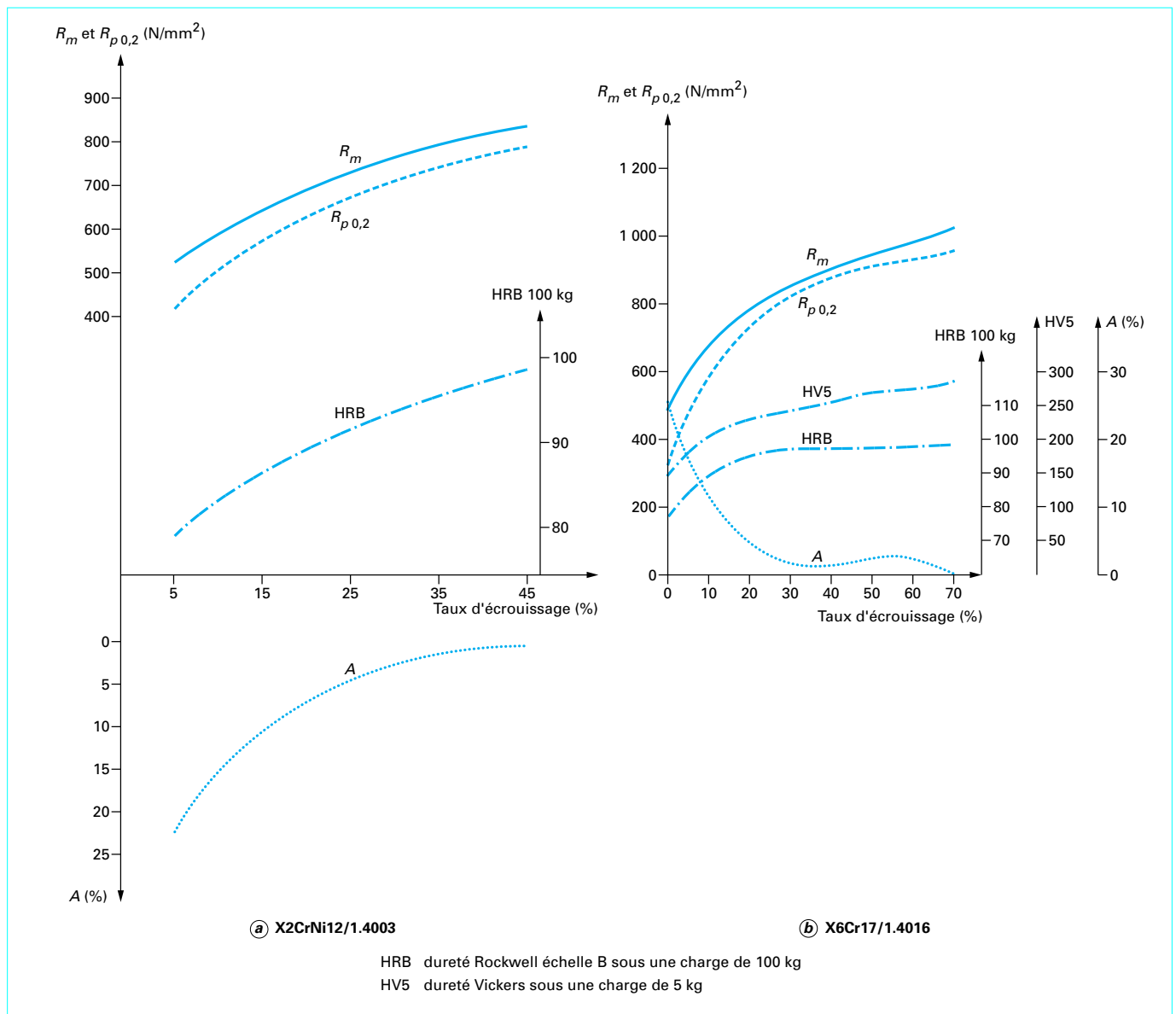


Figure 34 – Évolution des caractéristiques mécaniques de deux aciers inoxydables ferritiques à 11 et 17 % de chrome en fonction du taux d'écrouissage

Les nuances ferritiques stabilisées, dont les propriétés de résistance à la corrosion ont été évoquées précédemment, possèdent également des caractéristiques mécaniques remarquables, notamment en ce qui concerne leur ductilité. C'est ce que traduisent les courbes de la figure 35 pour les nuances stabilisées au titane, en particulier pour la nuance à 12 % de chrome X2CrTi12/1.4512 et pour celle à 17 % de chrome X3CrTi17/1.4510.

2.3 Aciers inoxydables austénitiques

Les aciers austénitiques dont la nuance X5CrNi18-10/1.4301 est la plus représentative présentent, après hypertrempe, à la température ambiante une **structure austénitique métastable**. Suivant son

degré de stabilité, fonction de sa composition chimique, l'austénite va se transformer partiellement en **martensite α'** lorsque le matériau est soumis à un écrouissage suffisant ou à un abaissement de la température. La formation de la **martensite α'** (structure cubique centrée) ne se fait pas, en général, directement à partir de l'**austénite γ** mais par l'intermédiaire d'une phase constituée par une **martensite ϵ** à structure hexagonale compacte qui, contrairement à la martensite α' , n'est pas ferromagnétique. L'équilibre entre les différentes phases : austénite γ , martensite ϵ et martensite α' est fonction de la déformation ou de l'écrouissage. Lorsque la déformation croît, la quantité de martensite ϵ diminue rapidement. La vitesse de formation de la martensite α' pendant la déformation du matériau joue un rôle fondamental dans le phénomène de consolidation qui se manifeste notamment lors de l'essai de traction.

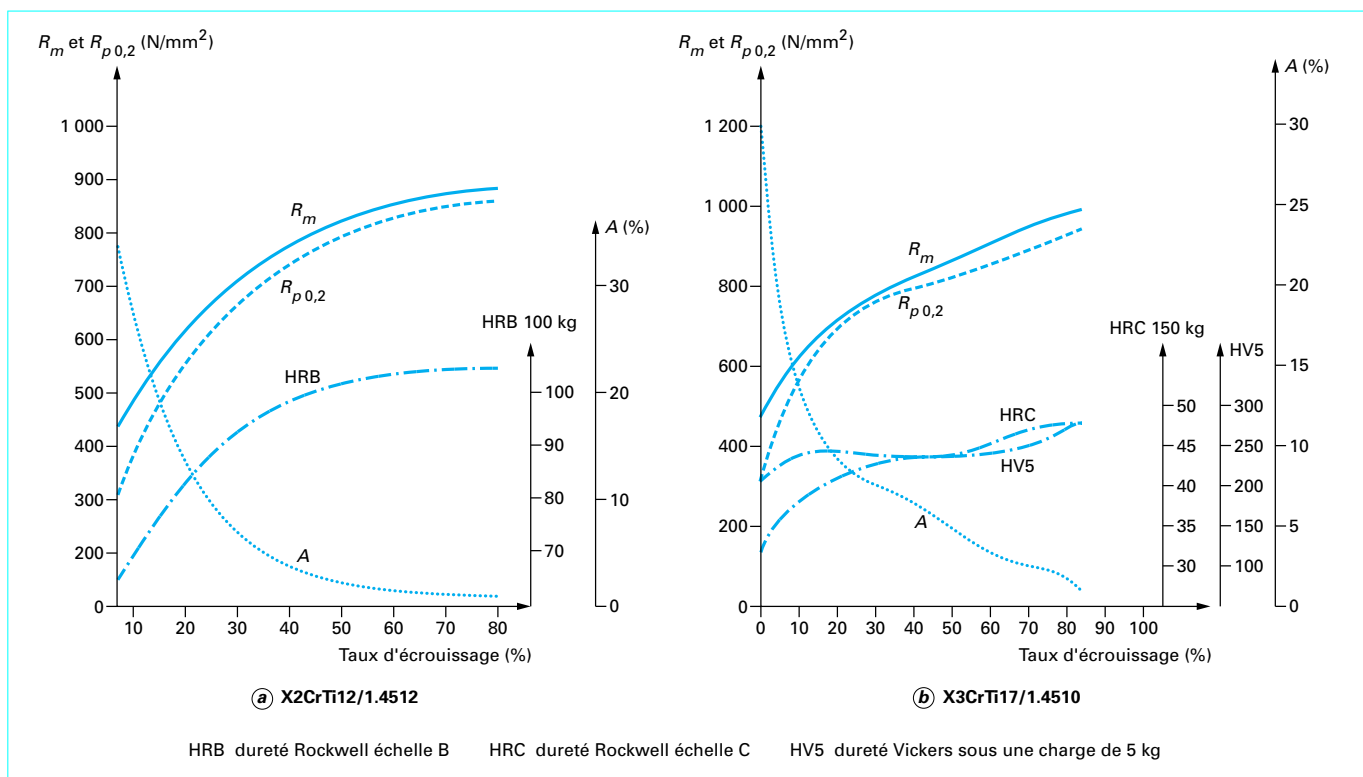


Figure 35 – Évolution des caractéristiques mécaniques de deux aciers inoxydables ferritiques à 12 et 17 % de chrome stabilisés au titane en fonction du taux d'écroutissage

Si l'on compare la courbe de traction « conventionnelle » d'un acier inoxydable ferritique et celle d'un acier inoxydable austénitique à l'état hypereffimé, on voit apparaître une différence fondamentale. Comme nous l'avons indiqué au paragraphe 2.2, la courbe relative à l'acier inoxydable ferritique présente un domaine élastique où le module d'Young est constant.

Au contraire, la courbe d'un acier inoxydable austénitique a une pente continuellement décroissante sans aucune discontinuité. Il n'apparaît aucune séparation entre le domaine élastique et le domaine plastique lorsque des déformations croissantes sont appliquées. C'est fort de ce constat que le modèle analytique généralement adopté pour décrire la courbe contrainte-déformation est basé sur l'équation de Ramberg et Osgood :

$$A = \sigma/E_0 + k(\sigma/R_{p0,2})^n$$

- avec A la déformation normale (%),
- σ la contrainte normale (N/mm²),
- E_0 le module d'élasticité (module d'Young) initial (N/mm²),
- $R_{p0,2}$ la limite d'élasticité à 0,2 % d'allongement (N/mm²),
- k et n des constantes déterminées pour deux contraintes égales à 0,7 $R_{p0,2}$ et 0,85 $R_{p0,2}$

La modification introduite par Hill [48] permet de calculer n et k à partir de deux couples de valeurs de contrainte (σ)-déformation (A), c'est-à-dire : σ_1/A_1 et σ_2/A_2 .

Dans ces conditions :

$$n = \lg(A_2/A_1) / \lg(\sigma_2/\sigma_1)$$

$$\text{et } k = A_2/(\sigma_2/E_0)^n \quad \text{ou} \quad k = A_1/(\sigma_1/E_0)^n$$

en choisissant $\sigma_2 = R_{p0,2}$ et $A_2 = 0,2\%$, l'équation $A = f(\sigma)$ devient :

$$A = \sigma/E_0 + 0,002 (\sigma/R_{p0,2})^n.$$

De cette équation, on peut déduire (figure 34) l'expression du *module tangent* :

$$E_t = d\sigma/dA$$

et celle du *module sécant* :

$$E_s = \sigma/A$$

soit :

$$E_t = [1 + 0,002n(E_0/R_{p0,2})(\sigma/R_{p0,2})^{n-1}]^{-1} E_0$$

$$E_s = [1 + 0,002(E_0/\sigma)(\sigma/R_{p0,2})^n]^{-1} E_0$$

Ces modules sont tous les deux fonctions de la contrainte σ appliquée. Ils sont respectivement utilisés dans le calcul d'éléments de structure, le module d'Young considéré comme une constante dans le domaine élastique ne pouvant plus s'appliquer aux alliages austénitiques. Quant à l'exposant, suivant le type de nuance, il peut varier de 4 à 8.

■ Le comportement à l'écroutissage des aciers inoxydables repose sur l'analyse de la courbe de traction (figure 36). Une analyse plus précise du comportement des aciers inoxydables austénitiques peut être faite à partir de la courbe rationnelle de traction dont l'équation simplifiée est donnée par la relation établie par Hollomon :

$$\sigma = k\varepsilon^n$$

avec $\sigma = F/S$ la contrainte vraie (N/mm²),

ε la déformation rationnelle définie par la relation :

$$\varepsilon = \int_{L_0}^L d\ell/\ell = \ln \ell/\ell_0$$

- où ℓ_0 représente la longueur initiale entre les deux repères placés sur la partie calibrée de l'éprouvette,
- ℓ la longueur finale,
- n une constante, appelée **coefficient d'écroutissage**,
- k un coefficient.

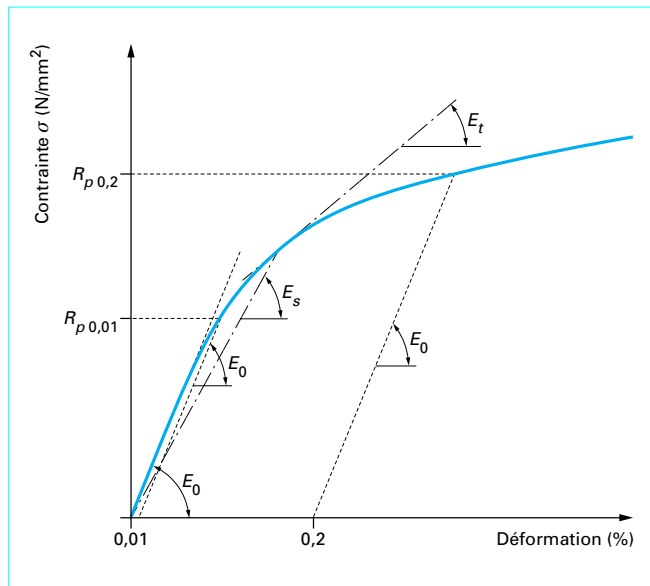


Figure 36 – Représentation schématique de la courbe contrainte-déformation d'un acier inoxydable austénitique

Le **taux d'écroissage** peut être déduit de la relation $\sigma = f(\epsilon)$. Par définition, c'est :

$$d\sigma/d\epsilon = f'(\epsilon)$$

Dans l'essai de traction, la déformation est uniforme jusqu'à l'apparition du phénomène de striction pour lequel l'effort de traction F est maximal. Il lui correspond une déformation uniforme ϵ_n qui est atteinte lorsque $dF = 0$. Comme :

$$F = \sigma S$$

avec S la section vraie de l'éprouvette, il vient lorsqu'on différencie cette expression :

$$dF/F = d\sigma/\sigma + dS/S$$

soit pour $dF = 0$, c'est-à-dire pour l'effort F maximal :

$$\sigma dS + S d\sigma = 0 \text{ ou } d\sigma/\sigma = -dS/S = d\ell/\ell = d\epsilon$$

d'où l'on déduit :

$$d\sigma/d\epsilon = \sigma$$

Si l'on admet que k et n sont des constantes, on peut écrire l'expression $\sigma = k\epsilon^n$ sous forme logarithmique :

$$\ln \sigma = \ln k + n \ln \epsilon$$

puis en différenciant, il vient :

$$d\sigma/\sigma = n d\epsilon/\epsilon \text{ ou } d\sigma/d\epsilon = n \sigma/\epsilon$$

Nous avons déterminé précédemment que dans les mêmes conditions nous obtenons :

$$d\sigma/d\epsilon = n$$

En comparant les deux expressions ci-dessus de $d\sigma/d\epsilon$, on a déduit la déformation rationnelle répartie :

$$n = \epsilon_n$$

En fait, le rapport $\ln \sigma / \ln \epsilon$ n'est pas correctement représenté par une droite car n n'est pas constant. C'est la raison pour laquelle plusieurs chercheurs ont essayé de trouver une meilleure expression analytique de la relation $\sigma = f(\epsilon)$, mais aucune n'est vraiment satisfaisante pour rendre compte du fait que $d\sigma/d\epsilon$ n'est pas une fonction linéaire de la déformation, mais qu'elle passe, pour les aciers austénitiques instables, par un minimum puis par un

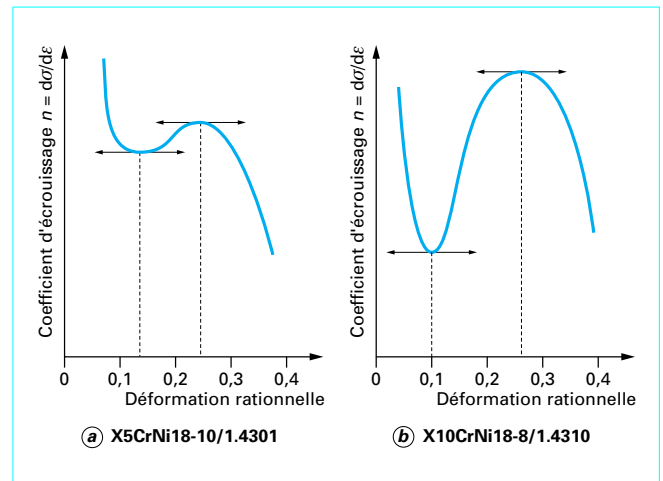


Figure 37 – Courbes dérivées $d\sigma/d\epsilon$ donnant le coefficient d'écroissage ou taux de consolidation en fonction de la déformation rationnelle pour deux nuances austénitiques instables

maximum. Si l'on examine en détail non pas la courbe $\sigma = f(\epsilon)$ mais sa courbe dérivée $d\sigma/d\epsilon = f'(\epsilon)$, le taux d'écroissage :

$$n = d\sigma/d\epsilon$$

présente un minimum et un maximum très nets (figure 37). L'existence de ces deux extremums avec les austénites instables résulte de la formation de martensite pendant la déformation. Le point minimal se situe légèrement en dessous du seuil de formation de la martensite tandis que le point maximal correspond à la déformation pour laquelle la formation de martensite est maximale. La comparaison des deux courbes de la figure 37 montre bien la consolidation supplémentaire due à la formation de la martensite. Le supplément de consolidation conféré par la martensite a pour effet de déplacer vers le haut la courbe $d\sigma/d\epsilon$ et, par conséquent, d'augmenter la déformation maximale.

D'une manière générale, on peut affirmer que la **consolidation globale est la résultante de trois mécanismes** :

- pour des déformations généralement inférieures à 0,15, on observe un écoulement viscoélastique de l'austénite. Il se traduit par une décroissance du coefficient d'écroissage jusqu'à une valeur minimale ;
- avec la formation et la croissance de la martensite, on observe une augmentation rapide du coefficient d'écroissage. Pour une même nuance, cette augmentation est d'autant plus rapide que la température est basse. Entre + 20 et - 80 °C, l'augmentation varie, pour la nuance X5CrNi18-10/1.4301, dans un rapport de l'ordre de 1 à 4 000 ;
- après avoir atteint une valeur maximale pour des déformations de l'ordre de 0,25, le coefficient d'écroissage décroît rapidement. Le phénomène est lié à la saturation des phases présentes et au fait que l'écroissage de la martensite est nettement plus faible que celui de l'austénite.

Cette analyse qualitative montre que les courbes $\sigma = f(\epsilon)$ et $n = f'(\epsilon)$ sont complexes et qu'il n'a pas été possible, jusqu'alors, de les modéliser correctement. Si maintenant, l'on considère la première partie de la courbe de traction, on voit que, pour contrainte inférieure à 100 N/mm², il y a retour au point zéro lorsque la charge est supprimée. Au-delà de 100 N/mm², on passe progressivement du domaine élastique au domaine plastique, puisqu'on observe une déformation permanente lorsque la contrainte est annulée. Ainsi, si l'on soumet le matériau à une contrainte d'environ 130 N/mm², on

observe un allongement résiduel de 0,04 % lorsque la charge est supprimée (figure 38). Si, à partir de cet état, on procède par charges et décharges successives, on voit qu'après chaque nouvelle application de la charge, la relation contrainte/déformation est linéaire jusqu'à une courbe enveloppe qui n'est autre que la courbe de traction obtenue sans décharges intermédiaires.

Grâce à ce traitement de précontrainte, la limite d'élasticité R_p peut être significativement améliorée. Par un traitement de précontrainte consistant à appliquer des charges et décharges successives, on montre ainsi que la limite d'élasticité conventionnelle à p % d'un alliage austénitique partiellement instable précontraint à m % sous un effort de traction est égale à la limite d'élasticité conventionnelle à $(m + p)$ % d'allongement rémanent (par rapport à l'état initial du matériau). C'est ce qu'illustre la figure 38. Il est également important de constater que le matériau écroui de cette manière possède un comportement élastique réversible sous des contraintes pouvant atteindre 85 % de la précontrainte appliquée.

On voit ainsi tout le bénéfice que l'on peut tirer de ce type de traitement lorsqu'il est appliqué sous la forme d'une épreuve hydraulique à des appareils à pression à paroi mince. Le matériau possède alors une élasticité véritable complètement indépendante de la limite d'élasticité mesurée à l'état initial pourvu que la pression hydraulique d'épreuve soit au moins 1,3 fois la pression de service. Lorsque les aciers inoxydables austénitiques « partiellement » instables sont écrouis à l'état de livraison, leurs caractéristiques mécaniques (R_m et R_p) peuvent être quasi doublées tout en gardant une réserve d'allongement. La figure 39, donne l'évolution des caractéristiques mécaniques pour deux nuances instables. Elle montre que pour un taux d'écrouissage de l'ordre de 40 %, le niveau des caractéristiques mécaniques (R_m et R_p) obtenu avec la nuance X2CrNi18-7/1.4318 est du même ordre de grandeur que celui obtenu avec la nuance la plus stable X5CrNi18-10/1.4301 pour un taux d'écrouissage d'environ 60 %.

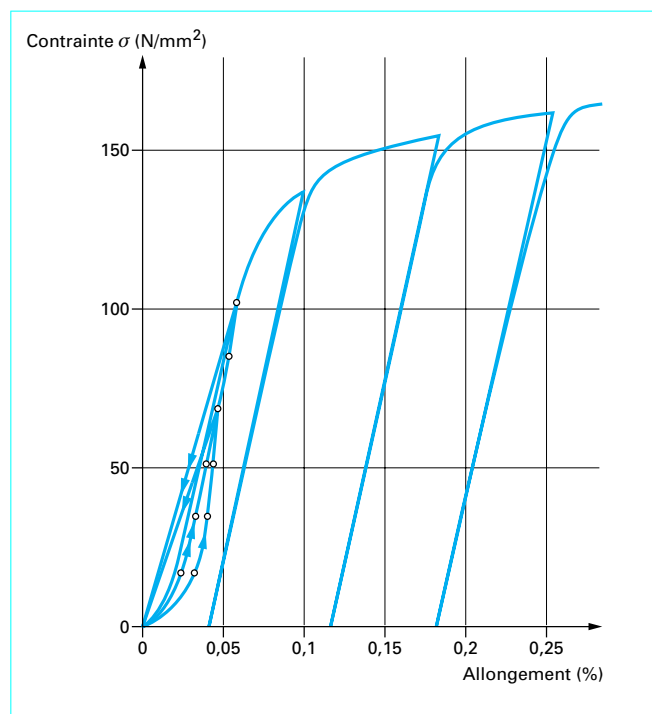


Figure 38 - Courbes contrainte-allongement de la nuance X2CrNi18-9/1.4307 obtenues par la méthode des charges et décharges successives

À l'opposé, une nuance très stable comme le X4CrNi18-12/1.4303 a ses caractéristiques mécaniques qui évoluent peu quel que soit le niveau d'écrouissage. Ses propriétés sont mises à profit dans le cadre d'opérations d'emboutissage par étirage ou par floutournage cylindrique. Le tableau 8 donne, de manière synthétique, l'évolution des caractéristiques mécaniques des nuances X5CrNi18-10 et X2CrNi18-7 en fonction de leur niveau d'écrouissage.

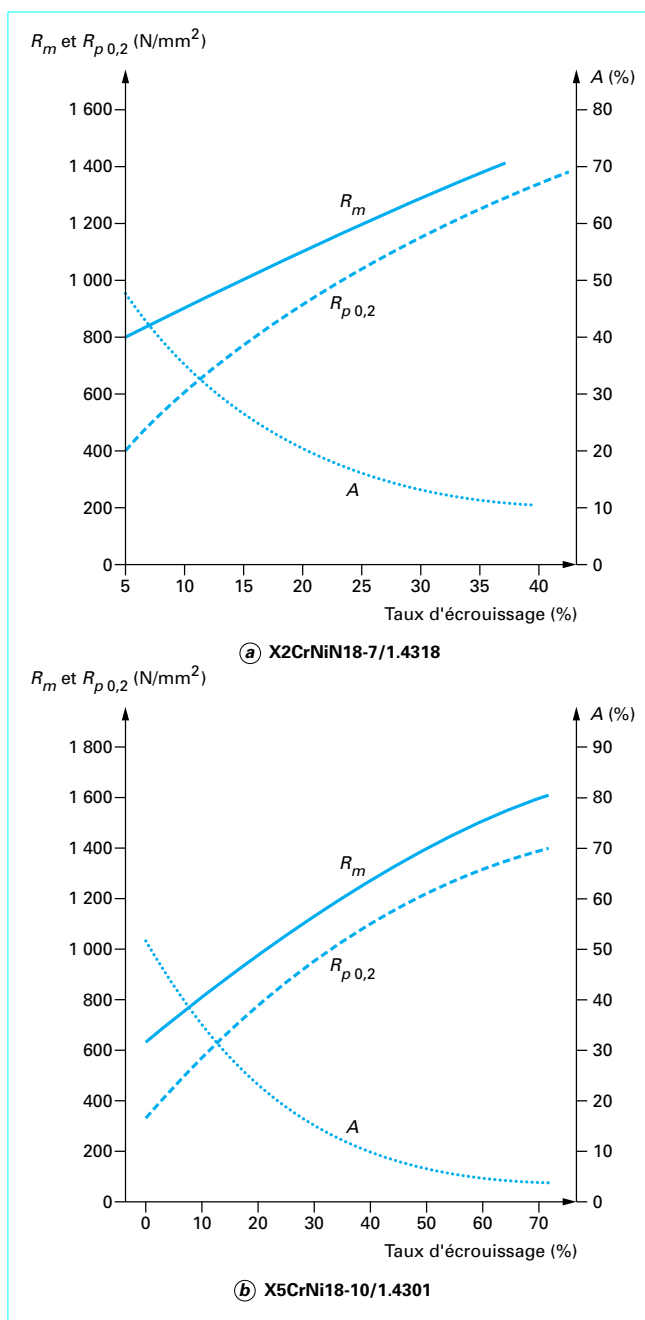


Figure 39 - Évolution des caractéristiques mécaniques de deux aciers inoxydables austénitiques métastables en fonction du taux d'écrouissage

Tableau 8 – Caractéristiques mécaniques des nuances X5CrNi18-10 et X2CrNiN18-7 en fonction de l'état d'écroutissage

Nuance	Limite d'élasticité $R_{p0,2}$ (N/mm ²)	Résistance à la rupture R_m (N/mm ²)	Allongement à rupture A (%)
X2CrNi18-7 :			
- recuit.....	370	800	53
- C 850 (1/4 dur).....	600	900	35
- C 1000 (1/2 dur).....	880	1 160	20
X2CrNi18-10 (recuit)			
	270	620	56

(1) Classes d'écroutissage selon la norme EN 10088-2 :
 - C 850 correspond à $R_m = 850$ à 1000 N/mm² ;
 - C 1 000 correspond à $R_m = 1 000$ à $1 150$ N/mm².

Le comportement spécifique des aciers inoxydables austénitiques vis-à-vis des propriétés statiques se retrouve également au niveau de leurs propriétés dynamiques, notamment en ce qui concerne leur capacité à absorber de l'énergie sous l'effet d'un choc. Pour des raisons de simplicité dans la réalisation d'absorbeurs d'énergie, la majorité des expériences ont été réalisées à l'aide de tubes mis en compression sous une charge dynamique conduisant à un flambement que l'on cherche à organiser. L'expérience montre que les meilleures performances des aciers austénitiques métastables sont obtenues lorsqu'on les sollicite dynamiquement en traction ou en expansion afin d'obtenir le plein effet de la consolidation.

Le module d'élasticité des aciers inoxydables austénitiques est de l'ordre de $200\ 000$ N/mm². Comme cela a déjà été indiqué, suivant leur instabilité, leurs caractéristiques mécaniques R_m , R_p et A peuvent varier dans de grandes proportions suivant le taux d'écroutissage qui leur est appliqué. Par rapport aux nuances martensitiques et ferritiques qui sont ferromagnétiques, les alliages austénitiques à l'état hypereutecté, c'est-à-dire lorsque leur structure est entièrement austénitique, sont amagnétiques.

Les autres propriétés physiques des aciers inoxydables austénitiques sont résumées au tableau 9.

Tableau 9 – Principales propriétés physiques des aciers inoxydables austénitiques

Masse volumique (kg/dm ³)	Module d'Young (N/mm ²)	Coefficient de dilatation linéaire entre 20 et 200 °C (en $10^{-6} K^{-1}$)	Capacité thermique massique (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	Résistivité électrique à 20 °C ($\mu\Omega.m$)
7,9	200 000	16,0	500	0,73

2.4 Aciers inoxydables austéno-ferritiques

Les caractéristiques mécaniques des aciers inoxydables austéno-ferritiques se distinguent principalement de celles des nuances austénitiques par une limite d'élasticité et une résistance à la rupture élevées. Par contre, leur allongement est nettement plus faible et leur domaine d'utilisation est limité à l'intervalle de température -50 °C/ $+300$ °C. À une limite d'élasticité $R_{p0,2}$ de l'ordre de 620 N/mm² correspondent une résistance à la rupture de 840 N/mm² et un allongement à rupture de 30 %.

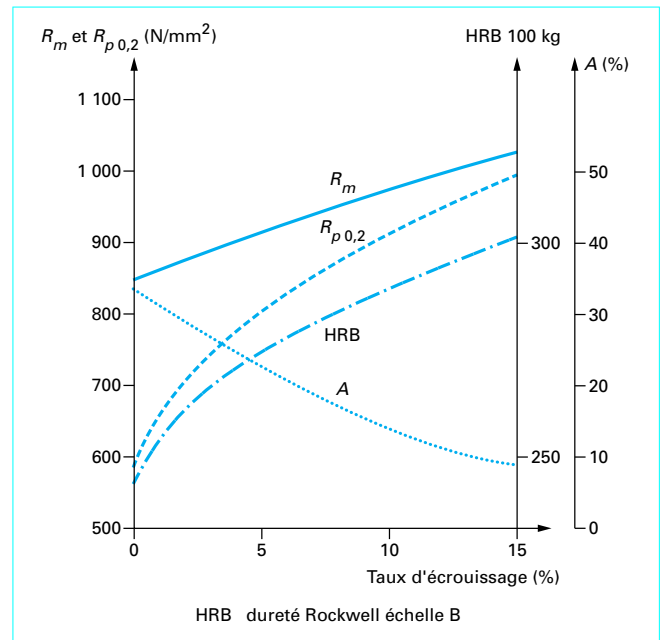


Figure 40 – Évolution des caractéristiques mécaniques de la nuance austéno-ferritique X2CrNiMoN22-5-3/1.4462 en fonction du taux d'écroutissage

Bien qu'inférieure à celle des nuances austénitiques, leur ténacité à basse température demeure élevée. Une valeur de résilience Charpy V (KCV) à -40 °C est couramment de l'ordre de 80 J/cm². Par ailleurs, les aciers inoxydables austéno-ferritiques sont relativement peu sensibles au phénomène d'écroutissage. C'est ce que schématisent les différentes courbes de la figure 40 pour un taux d'écroutissage limité à 15 %. La comparaison des caractéristiques mécaniques conventionnelles des principales nuances d'acier inoxydables en fonction de leur structure est donnée au tableau 10.

L'effet de la structure est particulièrement net sur l'allongement et la limite d'élasticité à l'état recuit.

Quant à leurs propriétés physiques, elles sont intermédiaires entre celles des nuances ferritiques et celles des nuances austénitiques. Le tableau 11 en donne un résumé.

Tout comme pour les caractéristiques mécaniques, on peut dresser un tableau comparatif des propriétés physiques des principales nuances d'aciers inoxydables. Ce résumé est donné au tableau 12.

Tableau 10 – Comparaison des caractéristiques mécaniques des principales nuances d'acier inoxydable

Structure	Limite d'élasticité $R_{p0,2}$ (N/mm ²)	Résistance à la rupture R_m (N/mm ²)	Allongement à rupture A (%)
Ferritique	370	500	26
Austéno-ferritique	620	840	30
Austénitique	270	620	56

Tableau 11 – Principales propriétés physiques des aciers inoxydables austénoferritiques

Masse volumique	Module d'Young	Coefficient de dilatation linéaire entre 20 et 200 °C	Capacité thermique massique	Résistivité électrique à 20 °C
(kg/dm ³)	(N/mm ²)	(en 10 ⁻⁶ K ⁻¹)	(J.kg ⁻¹ . K ⁻¹)	(μΩ.m)
7,8	200 000	13,0	500	0,8

Tableau 12 – Comparaison des propriétés physiques des principales nuances d'acier inoxydable

Structure	Module d'Young	Coefficient de dilatation linéaire entre 20 et 200 °C	Capacité thermique massique	Résistivité électrique à 20 °C
	(N/mm ²)	(en 10 ⁻⁶ K ⁻¹)	(J.kg ⁻¹ . K ⁻¹)	(μΩ.m)
Ferritique.....	220 000	10,0	460	0,60
Austénoferritique.....	200 000	13,0	500	0,80
Austénitique...	200 000	16,0	500	0,73

2.5 Aciers inoxydables à durcissement par précipitation

Les aciers inoxydables à **durcissement par précipitation** (DP) ou **precipitation hardening** (PH) sont des alliages dont les caractéristiques mécaniques sont obtenues après un traitement thermique à une température moyenne (température de revenu) qui provoque le durcissement grâce à un phénomène plus ou moins complexe de précipitation.

Comme cela est illustré dans l'article [M 4 540] (figure 21), les aciers à durcissement structural peuvent être classés suivant trois catégories :

- les aciers à transformation martensitique directe dont le plus courant est l'acier X5CrNiCuNb16-4/1.4542 (17-4 PH) ;
- les aciers à transformation martensitique indirecte appelés aussi semi-austénitiques dont le plus courant est l'acier X7CrNiAl17-7/1.4568 (17-7 PH) ;
- les aciers austénitiques dont le plus courant est l'acier X6NiCrTiMoVB25-15-2. C'est uniquement le phénomène de durcissement structural qui permet d'obtenir leurs caractéristiques mécaniques élevées.

En matière de caractéristiques mécaniques, il est absolument nécessaire de bien faire la différence entre les caractéristiques mécaniques à l'état de livraison (tableau 13), qui n'est qu'un état intermédiaire, et après traitement de durcissement par précipitation (tableau 14).

Par contre, les propriétés physiques des principales nuances citées aux tableaux 13 et 14 sont peu différentes. Elles sont résumées au tableau 15.

Tableau 13 – Caractéristiques mécaniques à l'état recuit

Nuance	Limite d'élasticité $R_{p0,2}$ (N/mm ²)	Résistance à la rupture R_m (N/mm ²)	Allongement à rupture A (%)
X5CrNiCuNb16-4 1.4542 (17-4 PH)	940	1 180	6
X8CrNiMoAl15-7-2 1.4532 (PH 15-7 Mo)	370	940	35
X7CrNiAl17-7 1.4568 (17-7 PH)	280	900	35

Tableau 14 – Caractéristiques mécaniques après traitement de durcissement par précipitation

Nuance	Limite d'élasticité $R_{p0,2}$ (N/mm ²)	Résistance à la rupture R_m (N/mm ²)	Allongement à rupture A (%)
X5CrNiCuNb16-4 1.4542 (17-4 PH)	1 300	1 200	8
X8CrNiMoAl15-7-2 1.4532 (PH 15-7 Mo)	1 400	1 450	7
X7CrNiAl17-7 1.4568(17-7 PH)	1 300	1 400	9

Tableau 15 – Propriétés physiques des principaux aciers inoxydables à durcissement par précipitation après traitement de durcissement

Masse volumique	Module d'Young	Coefficient de dilatation linéaire entre 20 et 200 °C	Capacité thermique massique	Résistivité électrique à 20 °C
(kg/dm ³)	(N/mm ²)	(en 10 ⁻⁶ K ⁻¹)	(J.kg ⁻¹ . K ⁻¹)	(μΩ.m)
7,7	200 000	11,2	460	0,80

Aciers inoxydables

L'étude complète du sujet comprend les dossiers :

- M 4 540 – Aciers inoxydables. Critères de choix et structure ;
- M 4 541 – Aciers inoxydables. Propriétés. Résistance à la corrosion ;
- M 4 542 – Aciers inoxydables. Mise en œuvre ;
- M 4 543 – Aciers inoxydables. Fabrication ;
- Doc. M 4 544v2 – Aciers inoxydables (le présent dossier).

Références bibliographiques

- [1] TALBOT (J.). – *Les éléments chimiques et les hommes*. 1995, SIRPE Éditeur, France.
- [2] GUILLET (L.). – Rev. Met. 1904,-1-155, 1905 -2-350, 1906-3-372.
- [3] PORTEVIN (A.). – Iron and Steel Institute, Carnegie Scholarship Memous, 1909, 1-230.
- [4] IESEN (W.). – Iron and Steel Institute, Carnegie Scholarship Memous, 1909, 1-1.
- [5] MAURER (E.) et STRAUSS (B.). – Kruppische Monatsch, 1920, 120.
- [6] MONNARTZ (P.). – Métallurgie, 1911, 8-161.
- [7] CHEVENARD (P.). – C.R. Acad. Sci., 1929, 189-576.
- [8] MALIOTIS (G.). – Chromium Uses & Markets, 1996 Industrial Minerals Information, Surrey.
- [9] SASSOULAS (H.). – *Traitements thermiques des aciers inoxydables* M 1 155. (1997) Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques, volume M 4.
- [10] BAIN (E.-C.) et ABORN (R.-H.). – Metals Handbook, American Society for Metals, 1948, 1194.
- [11] LECKEN (E.-B.), FISHER (W.-A.) et LORENZ (K.). – Stahl und Eisen, 1961, 12-768.
- [12] PRYCE (L.) et ANDREWS (K.-W.). – J. Iron Steel Institute, 1960, 415.
- [13] SCHAEFFLER (A.-L.). – *Constitution Diagramme for Stainless Steel Weld metal*. Metal Progress, 1949, 56-680.
- [14] DeLONG (W.-T.). – *Ferrite in Austenitic Stainless Steel Weld Metal*. Adams lecture, Welding Journal, 1974, 7-273.
- [15] ESPY (R.-H.). – *Weldability of Nitrogen Strengthened Stainless Steels*. Welding Journal, 1982, 5-149s.
- [16] BUNGARDT (E.), KUNZE (E.) et HORN (E.). – *Structure du système fer-chrome-carbone*. 1950, 29-198.
- [17] CUNAT (P.-J.). – *Travailler les aciers inoxydables*. 1988, SIRPE Éditeur, Paris.
- [18] IRVINE (K.-J.), CROWE (D.-J.) et PICKERING (F.-B.). – *Métallurgie physique des aciers à 12 % de chrome*-J. Iron Steel Inst, 1960, 195-386.
- [19] CUNAT (P.-J.). – *Nouvel acier inoxydable à 11 % de chrome pour constructions soudées*. Séminaire sur les nouvelles applications de l'acier face à la concurrence des matériaux de substitution, Nations Unies, Commission économique pour l'Europe, Luxembourg 1988.
- [20] THIELMAN (R.-H.). – Proc. American Society for Testing and Materials, 1940, 40-788.
- [21] WRIGHT (R.-N.) et WOOD (J.-R.). – *Fe-Cr-Mn micro-duplex ferritic-martensitic stainless steels*. Met. Trans., 1977, 8A-2007.
- [22] KALTENHAUSER (R.-H.). – *Improving the engineering properties of ferritic stainless steels*. Metals Engineering Quarterly, 1971, 11-41.
- [23] BAERLECKEN (E.), FISHER (W.-A.) et LORENZ (K.). – *Investigations concerning the transformation behavior, the notched impact toughness and the susceptibility to intergranular corrosion of iron-chromium alloys with chromium to 30 %*. Stahl und Eisen, 1961, 81-768.
- [24] WRIGHT (R.-N.). – *Toughness of ferritic stainless steels*. Lula (R.-A.) Ed-American Society for Testing and Materials - STP 706, 1980, 2.
- [25] PICKERING (F.-B.). – *Physical metallurgical development of stainless steels*. Proc. of the Conf. Stainless Steels, Göteborg, 1984, 2.
- [26] ANGEL (T.). – *Formation of martensite in austenitic stainless steels*. J.I.S.I., 1954, 165.
- [27] RAMBERG (W.) et OSGOOD (W.-R.). – *Description of stress-strain curves by three parameters*. NACA technical note N° 927, 1944.
- [28] HILL (H.-N.). – *Determination of stress-strain relations from offset yield strength values*. NACA technical note N° 927, 1944.
- [29] JOHNSON (A.-L.). – *The structural performance of austenitic stainless steel members*. Cornell University, Report N° 327, 1968.
- [30] WANG (S.-T.). – *Cold rolled austenitic stainless steel: Material properties and structural performance*. Cornell University, Report N° 334, 1968.
- [31] COLOMBIER (L.) et HOCHMANN (J.). – *Aciers inoxydables – Aciers réfractaires*. Éditions DUNOD, 1965.
- [32] BINDER (W.-O.), FRANKS (R.) et THOMSON (J.). – Trans. ASM, 1955, 47-231.
- [33] OKAMOTO (G.) et SWIBATA (T.). – *Passivity of metals*. Frankenthal (R.-P.) et Kruger Edit, Electrochem. Soc. Peddington, NJ-USA, 1978, 646.
- [34] BAROUX (B.) et GORSE (D.). – *Physique des films passifs*. Dans « Corrosion localisée », (F) Dabosi, (G.) Béranger et (B.) Baroux, Éditeurs Scientifiques, les Éditions de Physique, les Ulis, 1994.
- [35] AUDOUARD (J.-F.). – *La corrosion uniforme*. Dans « Les aciers inoxydables », (P) Lacombe, (B.) Baroux, (G.) Béranger, Éditeurs Scientifiques, les Éditions de Physique, les Ulis, 1990.
- [36] MANKOWSKI (G.), LEMAITRE (C.) et STREHBLOW (H.-H.). – *Corrosion par piqûres*. Dans « Corrosion localisée », (F) Dabosi, (G.) Béranger et (B.) Baroux, Éditeurs Scientifiques, les Éditions de Physique, les Ulis, 1994.
- [37] BAROUX (B.), LEMAITRE (C.) et DABOSI (F.). – *Corrosion par piqûres et corrosion caverneuse*. Dans « Les aciers inoxydables », (P) Lacombe, (B.) Baroux, et (G.) Béranger, Éditeurs Scientifiques, les Éditions de Physique, les Ulis, 1990.
- [38] COMBRADE (P.). – *La corrosion caverneuse des alliages passivables*. Dans « Corrosion localisée », (F) Dabosi, (G.) Béranger et (B.) Baroux, Éditeurs Scientifiques, les Éditions de Physique, les Ulis, 1994.
- [39] BÉRANGER (G.) et CHARBONNIER J.-C.). – *La corrosion intergranulaire*. Dans « Les aciers inoxydables », (P) Lacombe, (B.) Baroux, et (G.) Béranger, Éditeurs Scientifiques, les Éditions de Physique, les Ulis, 1990.
- [40] BEAUNIER (L.), BÉRANGER (G.), CHARBONNIER J.-C.) et CIHAL (V.). – *Corrosion intergranulaire*. Dans « Corrosion localisée », (F) Dabosi, (G.) Béranger et (B.) Baroux, Éditeurs Scientifiques, les Éditions de Physique, les Ulis, 1994.
- [41] DESJARDINS (D.). – *Fissuration par corrosion sous contrainte des aciers inoxydables austénitiques et austéno-ferritiques*. Métaux Corrosion Industrie, 1982, 679, 81.
- [42] COMBRADE (P.). – *Corrosion sous contrainte et fatigue-corrosion*. Dans « Les aciers inoxydables », (P) Lacombe, (B.) Baroux, et (G.) Béranger, Éditeurs Scientifiques, les Éditions de Physique, les Ulis, 1990.

- [43] COPSON (H.-R.). – *Physical metallurgy of stress corrosion fracture* - Interscience, New York, 1959-247.
- [44] MAZILLE (H.). – *Autres formes de corrosion localisée. Corrosion galvanique et sélective.* Dans « Corrosion localisée », (F) Dabosi, (G.) Béranger et (B.) Baroux, Éditeurs Scientifiques, les Éditions de Physique, les Ulis, 1994.
- [45] SEDRIKS (A.-J.) et MONEY (K.-L.). – *Corrosion-fatigue properties of nickel-containing materials in seawater.* The International Nickel Company, New York, 1978.
- [46] SIMISON (S.-N.), DE SANCHEZ (S.-R.) et SCHIFFIN (D.-J.). – Corrosion, 1989, 45, 967.
- [47] BAROUX (B.), SALA (B.), JOSSIC (T.) et PINARD (J.). – *Détermination du potentiel de piqûre des aciers inoxydables : méthode statistique.* Matériaux et Techniques, 1985, 4,3.
- [48] HILL (H.-N.). – *Détermination of stress-strain relationships from offset strength values.* NACA technical note N° 927, 1944.
- [49] *Conseil pour le soudage des aciers inoxydables.* Office Technique pour l'Utilisation de l'Acier (OTUA), Éditions SIRPE, Paris-à paraître 1^{er} semestre 2000.
- [50] MASOUNAVE (J.), BLAIN (J.) et ESSADIQI (E.). – *La coulée directe des métaux.* Séminaire sur « Les nouvelles applications de l'acier face à la concurrence de matériaux de substitution », Nations Unies, Commission économique pour l'Europe, Luxembourg, 1988.
- [51] BIRAT (J.-P.). – *Recent advances in near-net shape flat steel manufacturing.* La Revue de Métallurgie – CIT, 1988, 11, 1387.
- [52] BERNARD (J.). – *L'oxydation des métaux.* Gauthier-Villard, Paris (1962).
- [53] SIMISON (S.-N.), DE SANCHEZ (S.-R.) et SCHIFFIN (D.-J.). – Corrosion, 45, (1989), 967.

Normalisation

Association française de normalisation (AFNOR)

NF EN 10020	09-00	Définition et classification des aciers (A 02-025)
NF EN 10088-1	09-05	Aciers inoxydables. Partie 1 : liste des aciers inoxydables (A 35-572-1)
NF EN 10088-2	09-05	Aciers inoxydables. Partie 2 : conditions techniques de livraison des tôles et bandes en acier de résistance à la corrosion pour usage général. (2 ^e tirage, avril 1997) (A 35-573-2)
NF EN 10088-3	09-05	Aciers inoxydables. Partie 3 : conditions techniques de livraison pour les demi-produits, barres, fils machines, fils tréfilés, profils et produits transformés à froid en acier résistant à la corrosion pour usage général (A 35-574-3)
NF EN 10095	07-99	Aciers et alliages de nickel réfractaires (A 35-584)
NF EN ISO 3651-1	08-98	Détermination de la résistance à la corrosion intergranulaire des aciers inoxydables. Partie 1 : aciers inoxydables austénitiques et austénoferritiques (duplex). Essais de corrosion en milieu acide nitrique par mesurage de la perte de masse (essai de Huey) (A 05-160)
NF EN ISO 3651-2	08-98	Détermination de la résistance à la corrosion intergranulaire des aciers inoxydables. Partie 2 : aciers inoxydables ferritiques, austénitiques et

austéno-ferritiques (duplex). Essais de corrosion en milieu contenant de l'acide sulfurique (A 05-159)

American Society for Testing and Materials (ASTM)

A262-98	Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels
	These practices cover the following five tests :
	Practice A-Oxalic Acid Etch Test for Classification of Etch Structures of Austenitic Stainless Steels (Sections 3 to 7, inclusive),
	Practice B-Ferric Sulfate-Sulfuric Acid Test for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels (Sections 8 to 14, inclusive),
	Practice C-Nitric Acid Test for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels (Sections 15 to 21, inclusive),
	Practice E-Copper-Copper Sulfate-Sulfuric Acid Test for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels (Sections 22 to 31, inclusive), and
	Practice F-Copper-Copper-Sulfate-50 % Sulfuric Acid Test for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Molybdenum-Bearing Cast Austenitic Stainless Steels (Sections 32 to 38, inclusive).

Principaux producteurs de produits plats

Europe

Acerinox (Espagne)
 Ugine & ALZ (Belgique)
 AST (Italie)
 Avesta-Sheffield (Suède et Grande-Bretagne)
 ThyssenKrupp Nirosta GmbH (Allemagne)
 Outokumpu (Finlande)
 Ugine & ALZ (France)

Amérique du Nord

Allegheny (États-Unis)
 AK Steel Corp. (États-Unis)
 Atlas Steel (États-Unis)
 J & L Sheet Metal Co. (États-Unis)
 North American Stainless (États-Unis)

Asie (hors Japon)

Jindal Stainless Ltd (Inde)
 Posco (Corée du Sud)

Thainox Steel Ltd (Thaïlande)

Yieh United Steel Corp. (Taiwan)

Japon

Daido
 Kawasaki
 Nippon Metal Industry
 Nippon Steel Metal Product Co.
 Nippon Yakin Kogyo Co.
 Nisshin Steel Co. Ltd
 NKK Corp.
 Sumitomo

Amérique latine

Acesita (Brésil)
 Mexinox Trading, S.A.DEC.V. (Mexique)

Afrique

Columbus Stainless (Pty) Ltd (Afrique du Sud)

p950 Tomographie à rayons X

Date de publication : 10/12/2013

Par :

Christian THIERY

Ingénieur traitement d'images et CND, Président du groupe « tomographie industrielle » (COFREND), Expert tomographie (groupe CEN) CEA

Cet article fait partie de la base documentaire :

CND : méthodes globales et volumiques

Dans le pack : **Contrôle non destructif**
et dans l'univers : **Mesures - Analyses**



Cet article peut être traduit dans la langue de votre choix.
Accédez au service *Traduction à la demande* dans votre espace « Mon compte ». (Service sur devis)

Document délivré le : 12/12/2014

Pour le compte : 7200034092 - // nc EDITIONS TECHNIQUES INGENIEUR // 217.109.84.129

Pour toute question :

Service Relation clientèle - Techniques de l'Ingénieur
249 rue de Crimée - 75019 - Paris

par mail infos.clients@teching.com ou au téléphone 00 33 (0) 1 53 35 20 20

Tomographie à rayons X

par **Christian THIERY**

*Ingénieur traitement d'images et CND
Président du groupe « tomographie industrielle » (COFREND)
Expert tomographie (groupe CEN)
CEA*

1. Principes physiques et mathématiques	P 950v3 - 2
1.1 Atténuation des rayons X par la matière.....	— 2
1.2 Production et détection du rayonnement X.....	— 4
1.3 Principes mathématiques de la reconstruction.....	— 5
2. Outil tomographique	— 7
2.1 Architecture générale.....	— 8
2.2 Performances en matière de résolution.....	— 10
2.3 Extension aux domaines extrêmes : très haute énergie et haute résolution.....	— 18
3. Évolution de la tomographie	— 20
4. Applications	— 21
4.1 Applications.....	— 21
4.2 Applications aux sciences du vivant.....	— 24
4.3 Perspectives d'avenir.....	— 25
5. Tomographie par autres rayonnements	— 28
5.1 Gamma tomographie.....	— 28
5.2 Tomographie à courants de Foucault.....	— 28
5.3 Résonance magnétique nucléaire RMN.....	— 28
5.4 Tomographie par neutrons.....	— 29
5.5 Tomographie Compton.....	— 29
5.6 Tomographie à ultrasons : échographie.....	— 29
5.7 Tomographie à émission de positrons.....	— 29
5.8 Laminographie calculée à rayonnement rétrodiffusé.....	— 29
5.9 Tomographie sismique et tomographie radar.....	— 29
5.10 Tomographies de procédés.....	— 30
6. Comparaison avec les autres méthodes de CND	— 30
7. Conclusion	— 30
Pour en savoir plus	Doc. P 950

La **tomographie** par absorption de rayons X est une technique non destructive qui permet la **reconstruction d'images « en coupe »** d'un objet à trois dimensions.

Son principe repose sur l'analyse multidirectionnelle de l'**interaction d'un faisceau de rayons X avec la matière**, par enregistrement avec des détecteurs du rayonnement transmis après traversée d'un objet.

Les données acquises lors de la prise de mesure (dont la durée varie d'une fraction de seconde à quelques heures selon l'installation) sont collectées suivant des orientations multiples dont le nombre et le pas sont fonction du type d'appareil et de la finesse de résolution.

À l'aide de ces données, une **image numérique** est calculée et reconstruite mathématiquement en niveaux de gris ou de couleurs dont chacun traduit point par point le coefficient d'atténuation local du faisceau incident. Celui-ci, après calibration et étalonnage, peut être traduit en échelle de densité.

La tomographie à rayons X permet donc d'accéder au cœur de la matière pour en apprécier les variations d'absorptions radiologiques et les **différences de composition**.

Elle permet également de localiser très finement toute **hétérogénéité, singularité, vide** ou **inclusion** présents dans un objet, ainsi que de vérifier l'**assemblage** et le **positionnement** des ensembles mécaniques complexes.

Enfin, lorsque les temps d'acquisition sont compatibles avec les vitesses de certains phénomènes physiques, la tomographie peut conduire à des mesures dynamiques pour suivre, par exemple, l'**évolution d'un matériau soumis à des contraintes**.

Développée pour le domaine médical, cette technique prometteuse a adapté ses paramètres au domaine industriel dont tous les secteurs peuvent bénéficier des possibilités, que ce soit en aéronautique, dans le secteur automobile, en fonderie, dans l'industrie minière ou pétrolière ou le secteur agroalimentaire.

La tomographie à rayons X est utilisée aussi bien en production, en phase de prototypage ou lors de la mise au point des procédés de fabrication.

Cet article présente les principes mathématiques et physiques qui participent à la technique tomographique. L'auteur insiste sur les paramètres importants pour l'acquisition d'une image de qualité et souligne les écueils à éviter, ainsi que les solutions à mettre en œuvre pour éviter les artefacts nuisibles sur la reconstruction, causes de diagnostics erronés en contrôle non destructif. Il présente aussi les raisons du développement indéniable de cette technique, qui, pour des contingences économiques de moindre coût, analyse précisément les défauts présents au sein de la matière et leur évolution possible pour les rendre acceptables dans de nombreux cas, faisant passer la technique d'une stratégie industrielle « zéro défaut » à une stratégie de « défaut admissible ». Enfin, grâce aux progrès réalisés sur les détecteurs et les calculateurs, la tomographie a trouvé un champ d'expérimentation nouveau dans les haute et très haute résolutions, ainsi que dans le domaine de la reconstruction tridimensionnelle.

1. Principes physiques et mathématiques

1.1 Atténuation des rayons X par la matière

Quand un **faisceau parallèle de rayons X monochromatiques** d'intensité I traverse, à incidence normale, une quantité de matière d'épaisseur infinitésimale dx , le faisceau transmis est atténué de l'intensité dI :

$$dI = I\mu \, dx$$

avec μ coefficient linéaire d'absorption.

Cela conduit à la **loi de Beer** donnant l'intensité transmise par une épaisseur x de la matière :

$$I_x = I_0 e^{-\mu x} \tag{1}$$

avec I_0 intensité incidente.

Dans le cas d'un matériau homogène constitué de n éléments avec les proportions exprimées en densité atomique (nombre

d'atomes par unité de volume du matériau), le **coefficient linéaire d'absorption** μ peut s'écrire :

$$\mu = \sum_{i=1}^n N_i \sigma_i$$

avec N_i densité atomique de l'élément i ,

σ_i section efficace de l'élément i .

La relation (1) peut faire intervenir explicitement la densité volumique ρ du matériau concerné si elle est mise sous la forme :

$$I_x = I_0 e^{-\frac{\mu}{\rho} \rho x} \tag{2}$$

avec $\frac{\mu}{\rho}$ **coefficient massique d'absorption** (souvent exprimé en cm^2/g) :

$$\frac{\mu}{\rho} = N_A \sum_{i=1}^n w_i \frac{\sigma_i}{A_i} \tag{3}$$

avec N_A constante d'Avogadro,

A_i masse atomique de l'élément i ,

w_i concentration pondérale de l'élément i dans le matériau ($w_i = N_i A_i / N_A \rho$).

ou bien encore :

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i w_i$$

avec

$$\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i = N_A \frac{\sigma_i}{A_i}$$

La section efficace totale σ_i d'un élément i est elle-même la somme de sections efficaces qui décrivent chacune la probabilité d'un événement susceptible de survenir à un photon X pour l'empêcher d'atteindre le détecteur, à savoir (pour un photon incident d'énergie $E < 1$ MeV) :

- l'absorption du photon avec éjection d'un (photo)électron issu d'une des couches électroniques de l'atome ;
- la diffusion cohérente (sans changement de longueur d'onde) ;
- la diffusion incohérente (effet Compton).

L'amplitude de chacun de ces termes dépend de l'énergie du photon incident et donc de la longueur d'onde du faisceau incident et du numéro atomique Z de l'atome avec lequel il interagit.

Pour les photons X de faible énergie, le mécanisme dominant est l'absorption du photon avec éjection d'un photoélectron, ce qui explique aussi les sauts d'absorption observés chaque fois que l'énergie du photon X atteint une valeur suffisante pour arracher un électron d'un niveau atomique profond. Au-delà de quelques dizaines de keV, la contribution de l'effet Compton devient progressivement prépondérante jusqu'à ce que (au-delà de 1 MeV) le phénomène dominant soit l'interaction du photon γ avec le

champ électrostatique du noyau atomique, ce qui conduit à l'absorption du photon incident et à la création d'une paire électron-positron (par un effet de matérialisation).

Les figures **1a**, **b** et **c** [9] représentent l'évolution de la section efficace, proportionnelle au coefficient linéaire d'absorption μ , en fonction de l'énergie E des photons pour trois éléments purs en se limitant au domaine énergétique de la tomodensitométrie conventionnelle ($E < 1$ MeV). Dans le domaine $1 \text{ keV} < E < 100 \text{ keV}$, dominé par l'absorption photoélectrique au moins pour les éléments moyens et lourds, de Z supérieur à 20 environ, la remarque essentielle concerne la décroissance rapide de μ (entre les seuils) quand l'énergie des photons croît et, pour une énergie de photons donnée, la croissance très forte de μ en fonction du numéro atomique de l'élément concerné. Ces deux comportements peuvent se résumer par une formule empirique du type :

$$\mu \approx CZ^4 \lambda^3$$

avec C constante,

λ longueur d'onde des photons X incidents.

Le tableau **1** donne les coefficients d'atténuation massique et la densité de quelques matériaux. Ces données permettent de déterminer l'épaisseur x de matériau nécessaire pour introduire une atténuation $I_x/I_0 = e^{-1} \approx 0,368$ (ordre de grandeur d'une atténuation significative sans être totale).

D'après [9], ces épaisseurs sont de l'ordre du millimètre pour le carbone alors qu'elles ne sont que de quelques micromètres pour l'or à $E = 10 \text{ keV}$ et qu'elles progressent d'un ou deux ordres de grandeur pour $E = 80 \text{ keV}$ (figure **1**).

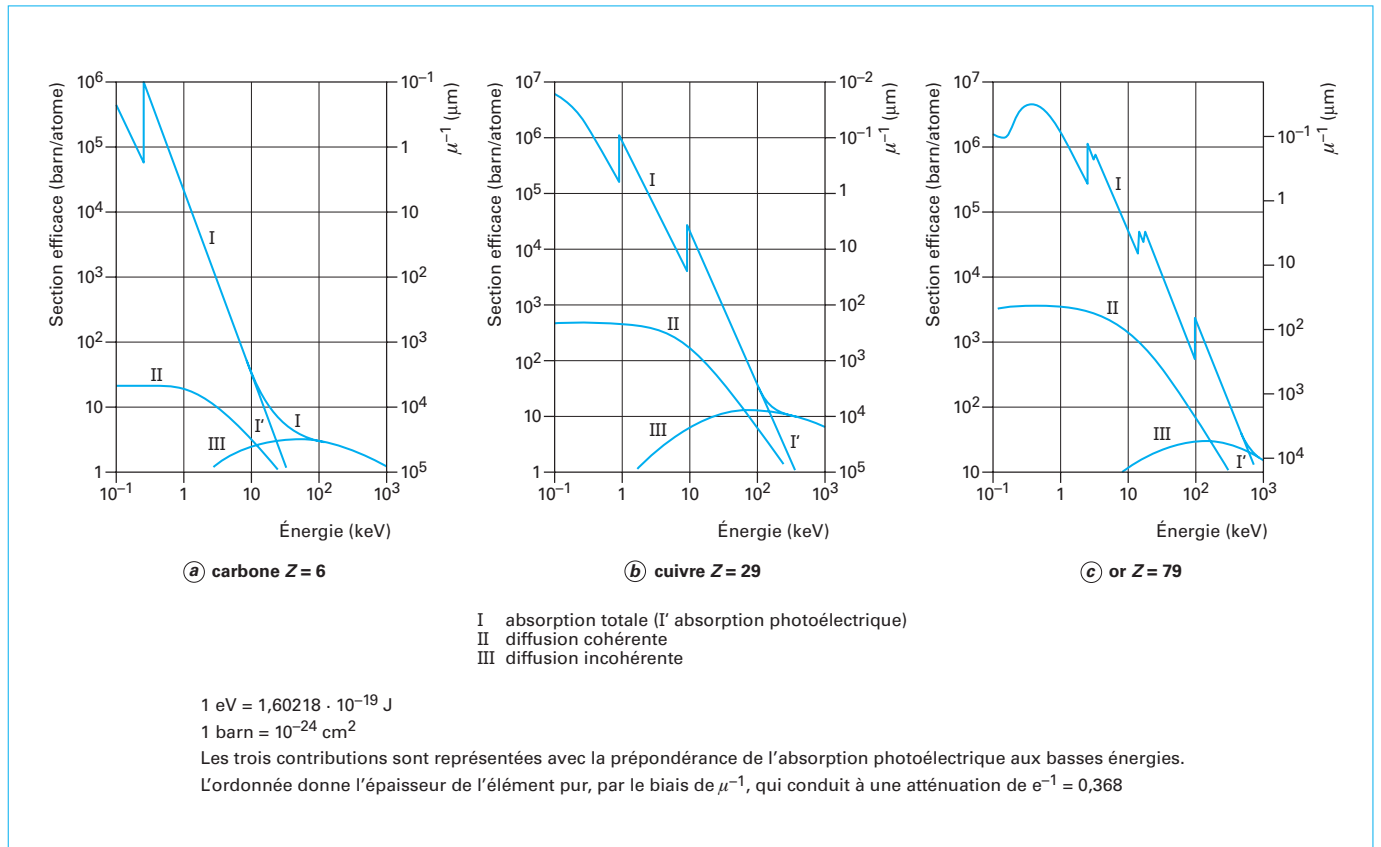


Figure 1 – Section efficace totale de différents éléments pour des photons X de 0,1 keV à 1 MeV [9]

Tableau 1 – Coefficient d'atténuation massique μ/ρ (en $10^{-1} \text{ cm}^2/\text{g}$) pour divers matériaux en fonction de l'énergie

Matériau	Énergie des photons (keV)								Densité (g/cm ³)
	50	100	150	200	300	400	500	1 000	
Aluminium	3,34	1,62	1,34	1,2	1,03	0,922	0,841	0,624	2,7
Cuivre	25,0	4,27	2,08	1,48	1,08	0,919	0,822	0,586	8,93
Fer	18,4	3,42	1,84	1,39	1,07	0,921	0,829	0,596	7,86
Tungstène	54,0	42,9	15	7,38	3,02	1,8	1,29	0,639	19,3
Plomb	72,2	52,3	18,9	9,45	3,83	2,2	1,54	0,69	11,34
Béton	3,61	1,7	1,4	1,25	1,07	0,958	0,873	0,637	2,3
Polyéthylène	2,01	1,70	1,53	1,40	1,22	1,09	0,995	0,727	0,92
Bakélite	1,91	1,58	1,42	1,30	1,13	1,01	0,921	0,673	1,2 à 1,7
Os	3,27	1,74	1,47	1,32	1,14	1,01	0,925	0,675	1,7 à 2
Muscle	2,14	1,66	1,48	1,35	1,17	1,05	0,959	0,700	» 1
Eau	2,14	1,68	1,49	1,36	1,18	1,06	0,967	0,707	1
Air	1,96	1,51	1,34	1,23	1,06	0,953	0,870	0,636	0,0012

La conséquence concrète est qu'un petit précipité de quelques micromètres de métal lourd comme l'or donne (à 80 keV et dans une matrice transparente) un contraste (significatif) équivalent à celui donné par une épaisseur cent fois plus grande de carbone. Cela explique aussi la nécessaire ingestion de sels de bismuth ($Z=83$) pour l'examen de l'abdomen d'un patient en radiologie médicale.

Plus précisément, on peut calculer, à partir de la formule (1) la **sensibilité en radiographie X** (c'est-à-dire son aptitude à discerner une variation locale d'absorption μ ou d'épaisseur x d'un petit détail); sachant que la variation correspondante du taux de comptage est au moins trois fois supérieure aux fluctuations statistiques du nombre de photons transmis par la matrice, soit N_x , on a approximativement :

$$\Delta(\mu x) \geq \frac{3}{\sqrt{N_x}}$$

quand $\Delta(\mu x)$ est plus petit que l'unité.

Les mêmes phénomènes expliquent aussi l'impossibilité physique d'observer des fissures ou cavités :

- dans des matériaux lourds et trop épais si l'atténuation exponentielle dans de tels matériaux conduit à une absorption quasi totale du rayonnement incident et donc à la suppression quasi complète du contraste correspondant ;
- dans un échantillon trop transparent qui introduit un bruit statistique ($\approx \sqrt{N_x}$) excessif.

En pratique, il est donc nécessaire d'ajuster l'énergie des photons incidents à l'épaisseur et à la nature de l'échantillon à radiographier. La sensibilité optimale est atteinte quand l'épaisseur d de l'échantillon est telle que :

$$d = \frac{2}{\mu}$$

Signalons enfin que la loi d'atténuation mise sous la forme (2) explique le nom de **densitométrie** puisque l'exposant est proportionnel à l'épaisseur massique ρx de l'échantillon alors que le coef-

ficient μ/ρ , quand il est explicité comme dans l'équation (3), est indépendant de ρ et donc de l'état (solide, liquide, ou gazeux) de cet échantillon.

1.2 Production et détection du rayonnement X

1.2.1 Production du rayonnement X

La tomographie dite « classique » utilise comme sources de rayonnement X des tubes scellés analogues à ceux utilisés en radiologie médicale ou en radiologie industrielle (cf. [R 1 400] *Contrôle non destructif (CND)*).

En **tomographie basse énergie**, le générateur délivre des photons d'énergie comprise entre 40 keV et 100 keV.

En **tomographie haute énergie** utilisée en milieu industriel, la source délivre un faisceau de rayons X d'énergie comprise entre 100 keV et 350 keV. Les flux délivrés sont intenses et la souplesse d'exploitation permet des réglages très précis par la haute tension ou des filtrations. Pour des raisons physiques, le générateur doit être utilisé dans le domaine Compton du matériau examiné.

Le spectre des rayons X émis par ces tubes est constitué d'un fond continu dû au freinage des électrons dans l'anticathode auquel se superposent les raies caractéristiques de celle-ci (figure 2) (cf. [P 2 695] *Spectrométrie d'émission des rayons X. Fluorescence X* et [P 2 645] *Spectrométrie de masse – Principe et appareillage*). La distribution spectrale $g(E)$ en fonction de l'énergie E du fond continu est donnée approximativement par la formule de Kramers [10] en négligeant l'absorption qui joue un rôle important aux faibles énergies :

$$g(E) = kZ [(eV/E) - 1]$$

avec V tension appliquée au tube,

e valeur absolue de la charge de l'électron ($1,60218 \times 10^{-19} \text{ C}$),

k coefficient de proportionnalité qui dépend des caractéristiques physiques de la cible de conversion (épaisseur, matériau, etc.)

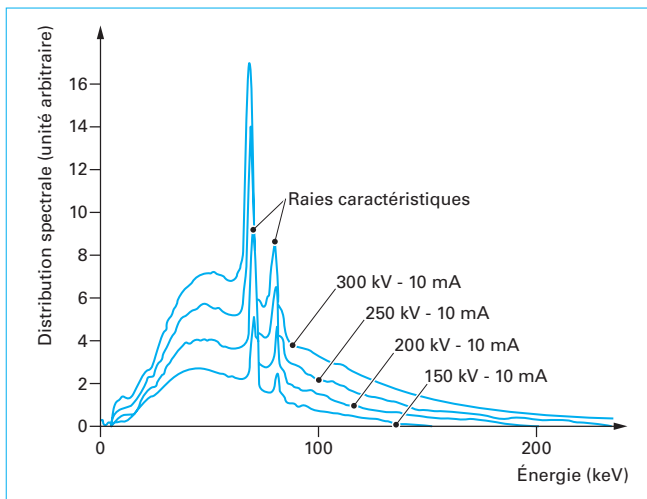


Figure 2 – Distribution spectrale des photons X émis par une anticathode de métal lourd bombardée par des électrons primaires de 150 à 300 keV

L'anticathode est presque toujours en tungstène, métal réfractaire et de numéro atomique Z élevé. Une augmentation de la tension appliquée V fait croître l'intensité des raies caractéristiques, sans les déplacer suivant la loi [11] :

$$(eV/E_x - 1)^{1,63}$$

avec E_x énergie de la série spectrale X correspondante (pour le tungstène, elle est de 69,5 keV).

Le rayonnement X ainsi émis est polychromatique, ce qui entraîne que :

- l'expression (1) de la loi de Beer doit être reformulée pour prendre en compte la structure spectrale (multiénergétique) du faisceau de rayons X émis ;
- on observe un phénomène de « durcissement » du spectre. En effet, comme le montre le tableau 1, le coefficient d'atténuation (noté μ/p) pour une énergie considérée est moins sensible à la nature des matériaux pour les gammes d'énergies plus élevées (supérieures à 200 keV). Ainsi, en raison de la polychromaticité, on observe une atténuation préférentielle des composantes spectrales de basse énergie due à la modification de l'interaction entre le rayonnement incident et le matériau constituant l'objet analysé.

1.2.2 Détection du rayonnement X transmis

Les détecteurs sont placés dans l'axe du faisceau, derrière l'objet à analyser (figure 3) [13]. Ils délivrent des signaux analogiques issus de la création d'un courant proportionnel au nombre de photons reçus.

Trois types de détecteurs sont utilisés en tomographie :

- les détecteurs à gaz du type compteur proportionnel (xénon sous pression, surtout dans les installations de basse énergie utilisées dans le domaine médical) ;
- les détecteurs semi-conducteurs (installations de très hautes énergies) ;
- les sondes à scintillation (germanate de bismuth $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) ou CdWO_4) qui, associées à un photomultiplicateur, convertissent les photons X en photons visibles.

Les détecteurs doivent permettre des temps d'intégration extrêmement courts (fraction de seconde), ce qui impose des fronts de montée et de descente du signal très brefs afin d'obtenir une réponse quasi instantanée aux fluctuations de la fluence du rayonnement X.

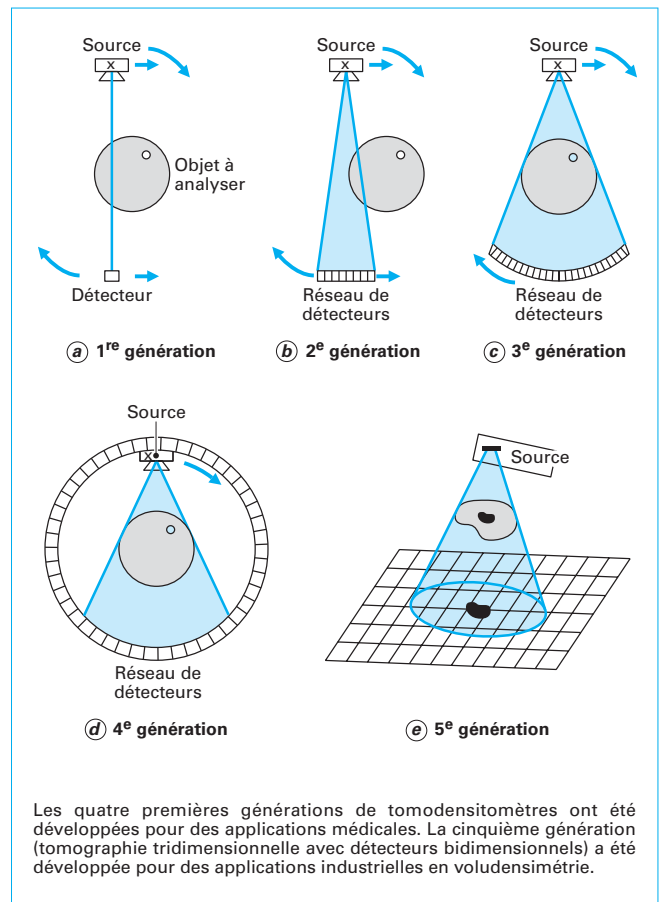


Figure 3 – Générations de tomographes [13]

Les quatre premières générations de tomodensitomètres ont été développées pour des applications médicales. La cinquième génération (tomographie tridimensionnelle avec détecteurs bidimensionnels) a été développée pour des applications industrielles en voludensimétrie.

1.3 Principes mathématiques de la reconstruction

Consulter l'article *Transformations fonctionnelles* [A 1 240].

1.3.1 Principe général

■ Théorie

Le principe général de la reconstruction est illustré par la figure 4 sur laquelle le faisceau incident est supposé parallèle (pour simplifier).

L'image à reconstruire est composée de $m \times n$ points, appelés pixels (*picture elements*), affectés chacun d'un coefficient d'absorption μ_{ij} , (ou d'une densité locale ρ_{ij}) qu'il convient de déterminer.

L'intensité mesurée par le détecteur k quand le réseau de détecteurs est en position 1, soit I_{1k} , est telle que :

$$\ln \left(\frac{I_0}{I_k} \right) \propto \sum_{ij} \rho_{ij}$$

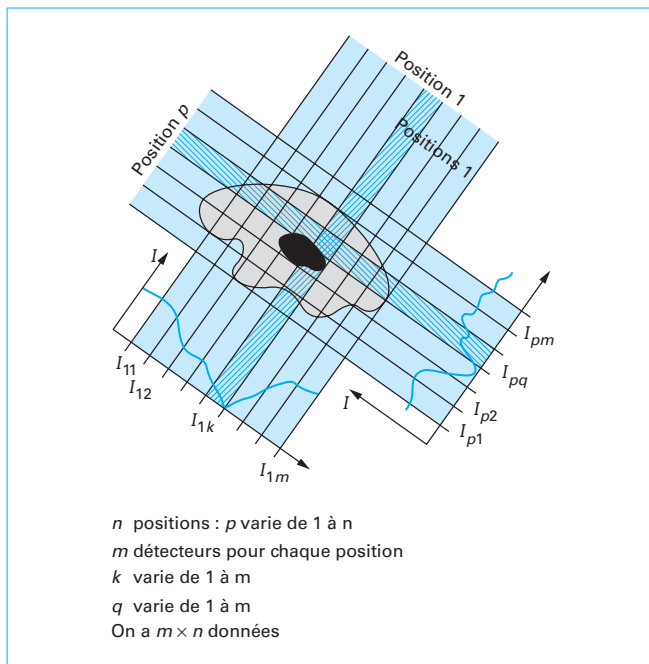


Figure 4 – Principe général de la reconstruction : recueil des données

Dans cette expression, la sommation porte sur l'ensemble des pixels de la surface en forme de bande (hachurée sur la figure 4) délimitée par la taille de la source et le détecteur élémentaire concerné.

Il en est de même pour toutes les positions successives (1 à n) prises au cours des rotations relatives du couple source-détecteur par rapport à l'objet.

En position p , le détecteur q mesure l'intensité I_{pq} donnée par l'expression :

$$\ln \left(\frac{I_0}{I_{pq}} \right) \propto \sum_{i'j'} \rho_{i'j'}$$

Ici, la nouvelle sommation prend en compte les pixels de la seconde bande hachurée de la figure 4.

On établit ainsi un système d'équations linéaires dans lequel le logarithme des intensités est déduit des mesures, et les ρ_{ij} représentent les inconnues à déterminer. Une inversion de matrice doit permettre, en principe, d'exprimer ces inconnues en fonction des intensités mesurées, à condition que le système admette une solution, ce qui suppose au préalable que le nombre de grandeurs mesurées soit égal au nombre d'inconnues. Cela impose n positions angulaires distinctes (pour obtenir une image de $m \times n$ pixels avec un réseau de m détecteurs), soit un pas de variation angulaire $\Delta\theta = 180^\circ/n$.

Exemple

Le pas de rotation de la source et des détecteurs (pour les installations de première, deuxième et troisième générations (figure 3) est de l'ordre d'une fraction de degré pour une image de 512×512 pixels (et 512 acquisitions simultanées). Pour un échantillon de 10 cm de diamètre, cela conduit à une taille de pixel (et donc à une résolution) de l'ordre de 0,2 mm.

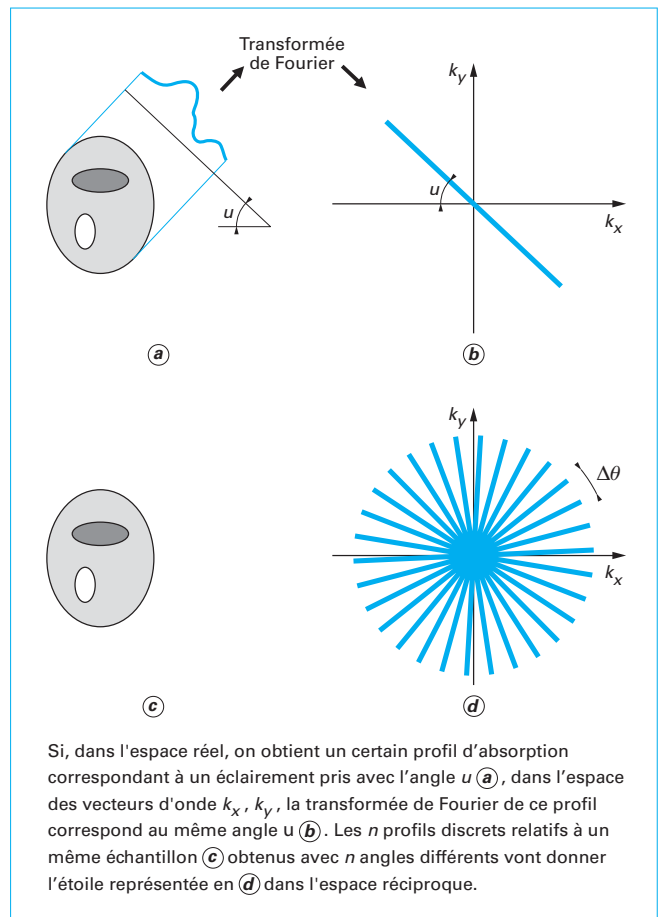


Figure 5 – Principe général de la reconstruction : espace des fréquences [15]

Dans la géométrie en éventail présentée sur la figure 7, les deux matrices (intensités et densités) sont corrélées entre elles par la transformation dite de Radon [14] [23] [A 1 240].

Sur le plan théorique, les limites introduites par la rotation pas à pas peuvent être déduites du théorème de la section centrale : un objet peut être représenté aussi bien dans l'espace réel (x, y) à deux dimensions que dans l'espace des fréquences (k_x, k_y) .

Or, la transformée de Fourier du profil correspondant à la projection de cet objet à deux dimensions est une section centrale de la transformée bidimensionnelle de l'objet, c'est-à-dire une ligne passant par l'origine de l'espace des fréquences. La rotation pas à pas conduit donc à couvrir l'espace des fréquences (k_x, k_y) de droites passant toutes par l'origine et décalées angulairement $\Delta\theta$ (figure 5) [15]. Plus on s'écarte du centre, plus la couverture de l'espace des fréquences est faible et plus la perte d'information sur des petits détails est élevée quand on procède à l'opération inverse (transformée de Fourier inverse) pour revenir à l'espace réel.

Ce raisonnement est généralisable à trois dimensions en substituant aux droites passant par l'origine dans l'espace des fréquences des plans contenant l'axe k_z (et donc l'axe de rotation de l'échantillon) et ayant pour traces dans le plan $k_x k_y$ les droites évoquées ci-dessus.

Mentionnons pour mémoire qu'il est théoriquement possible de peupler uniformément l'espace des fréquences en déplaçant la source X de façon aléatoire par rapport à l'échantillon.

■ En pratique, l'inversion de la matrice de Radon (512×512 à deux dimensions et $512 \times 512 \times 512$ à trois dimensions) introduit des temps de calcul prohibitifs même avec des ordinateurs de grande capacité. On préfère donc y substituer des algorithmes de mise en œuvre plus rapide. Il s'agit principalement de **méthodes de rétro-projection filtrée** (§ 1.3.2) et de **méthodes itératives** (§ 1.3.3).

1.3.2 Rétroprojection filtrée

La notion de rétroprojection (appliquée en général à la tomographie X) repose sur la démarche inverse de la précédente (et qui a été illustrée sur la figure 3) : partant du profil obtenu sur le réseau de détecteurs en position 1, on distribue uniformément l'intensité collectée par un détecteur élémentaire à l'intérieur de la surface limitée par la source et ce détecteur.

En procédant de même pour chaque détecteur et pour les n profils obtenus sous les n angles différents, la superposition des n rétroprojections va délimiter l'objet et moduler les différentes rangées introduisant des renforcements et des affaiblissements qui restituent la structure interne de l'objet initial (figure 6).

En fait, la reconstruction n'est pas parfaite et on observe que la rétroprojection d'un ensemble discret de n projections n'est pas identique à l'objet initial (la rétroprojection d'un objet ponctuel restitue une étoile à n branches). Pour améliorer la méthode, il faut procéder à une déconvolution par la fonction de projection qui est une fonction linéaire en k (vecteur d'onde). La méthode de rétro-projection filtrée consiste donc à prendre la transformée de Fourier de chaque profil, ensuite à amplifier proportionnellement les hautes fréquences (à l'aide d'un filtre) puis à revenir par transformation de Fourier inverse dans l'espace réel avant d'effectuer les opérations de rétroprojection.

1.3.3 Méthodes itératives

Les méthodes itératives ont en commun une **démarche par approximations successives** en supposant au départ une distribution de densité $\rho(x, y)$ plus ou moins arbitraire. On calcule ensuite les projections que cet objet devrait donner, et on compare le résultat avec les projections expérimentales pour corriger le modèle de départ. Après quelques itérations, la stabilité est en principe atteinte si on incorpore dans le processus de reconstruction des contraintes (c'est-à-dire des informations supplémentaires que l'on connaît sur l'objet) comme l'évidence de positivité de $\rho(x, y)$.

1.3.4 Reconstruction en trois dimensions

Tous les développements précédents § 1.3.2 et § 1.3.3 concernent en fait la reconstruction d'une coupe perpendiculaire à l'axe z de rotation. La juxtaposition des n coupes successives résultant des translations pas à pas de l'objet par rapport au plan source-détecteur permet de mémoriser les données d'un objet à trois dimensions $\mu(x, y, z)$. L'outil informatique permet de visualiser ultérieurement l'image d'une section quelconque de l'objet. Le plan choisi n'est pas nécessairement perpendiculaire à l'axe de rotation puisqu'il peut en particulier le contenir.

2. Outil tomographique

Née officiellement en 1971 à des fins d'applications médicales, la tomographie X a beaucoup évolué depuis, tant dans le domaine médical que dans le domaine industriel. Voir l'intérieur d'un objet pour en reconstruire la structure interne en trois dimensions, domaine d'excellence de la tomographie, apparaît être en effet un atout majeur dans la mise au point et la fabrication des pièces industrielles pour lesquelles la bonne qualité des matériaux (absence de défauts) demeure la plus sûre garantie contre des faiblesses et fragilisations en fonctionnement.

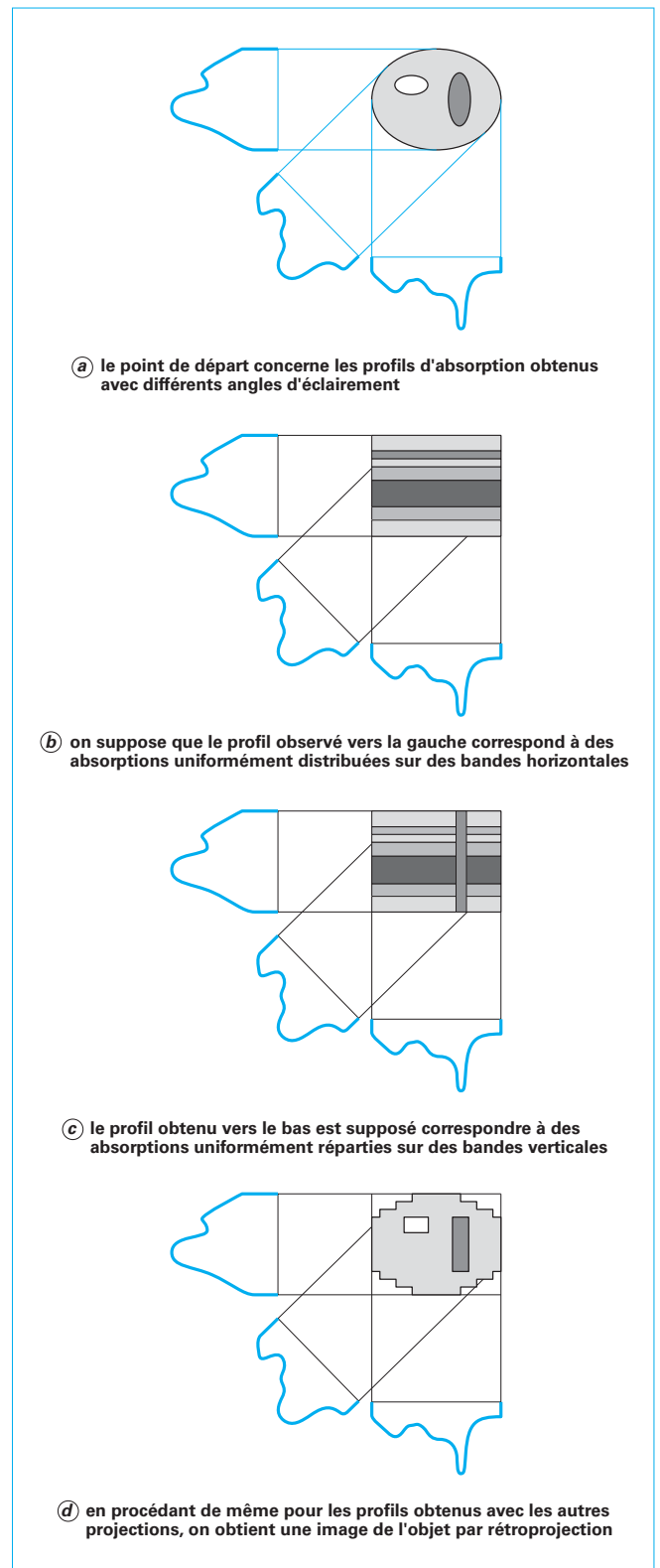


Figure 6 – Illustration du principe de rétroprojection

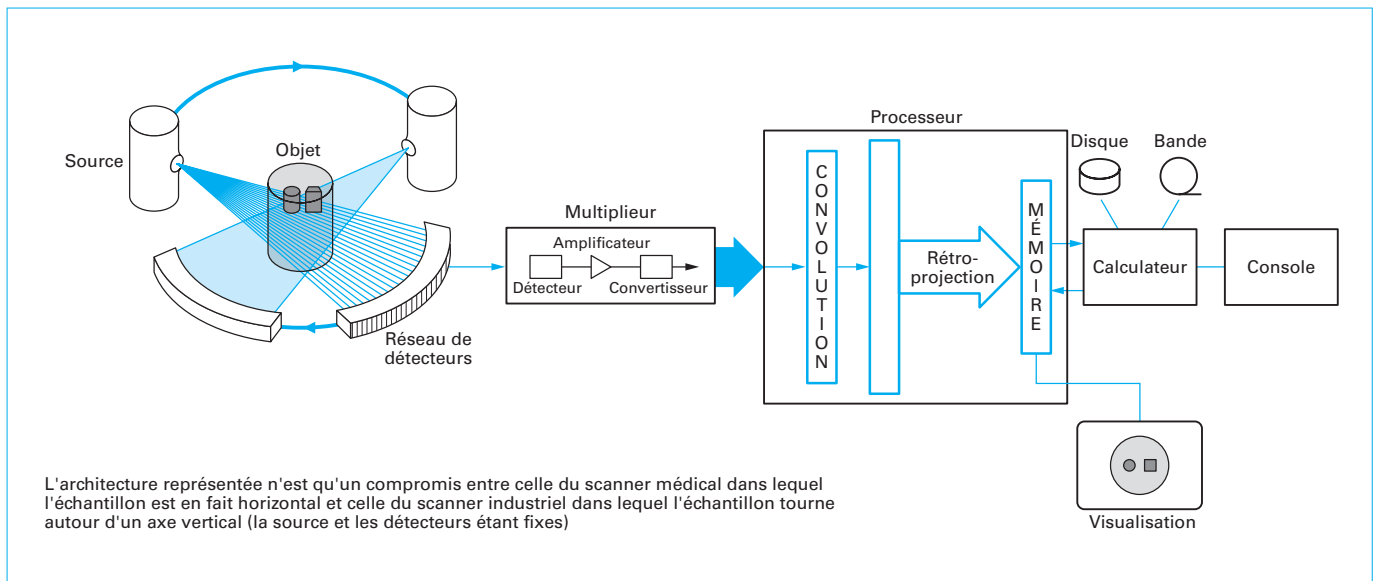


Figure 7 – Architecture d'un tomodensitomètre (géométrie en éventail) et principales opérations de traitement du signal [13]

2.1 Architecture générale

2.1.1 Architecture d'un tomographe

Le dispositif le plus fréquemment rencontré s'appuie sur une géométrie en éventail représentée (figure 7) [13].

Avec un tel dispositif, la **résolution géométrique** r_g dans une direction est fonction de la dimension S de la source et de celle D d'un détecteur élémentaire dans la même direction :

$$r_g = S + \frac{D-S}{M} \quad (4)$$

Le grandissement géométrique M est de l'ordre de 2 quand l'échantillon se trouve à mi-distance entre la source et le détecteur.

La résolution latérale obtenue (de l'ordre d'une fraction de millimètre) résulte du compromis entre la meilleure résolution possible (celle qui tend à minimiser S et D) et la sensibilité qui conduirait, pour un temps de mesure donné, à accroître S (pour augmenter le flux incident) et D (pour accroître l'efficacité de détection de chaque détecteur). La hauteur h des détecteurs qui définit l'épaisseur des plans de coupe obéit au même compromis.

Avec le dispositif en éventail représenté sur la figure 7, l'image numérique en densité de l'objet dans le plan de coupe est déduite des diverses données recueillies par l'ensemble des détecteurs élémentaires au cours du mouvement de rotation.

Ce mouvement peut être réalisé par l'objet lui-même dans une configuration fixe du couple source-détecteur (§ 2.1.3), ou inversement (§ 2.1.2).

Quand une exploration angulaire complète de l'objet a été effectuée suivant un plan de coupe, une translation suivant un axe z permet de définir un plan de coupe adjacent au précédent qui est à son tour exploré angulairement et ainsi de suite.

L'exploration de l'objet par la succession de rotations suivies de translations pas à pas conduit à une acquisition de données qui vont permettre la reconstruction tridimensionnelle de l'objet.

Depuis la première mise en œuvre d'une installation tomographique, la technique a subi plusieurs évolutions technologiques qui sont symbolisées sur la figure 3.

Aujourd'hui, les configurations des installations tomographiques, qu'elles soient utilisées dans le domaine médical ou dans le domaine industriel, sont dans leur grand principe très voisines. Toutefois, il apparaît quelques différences essentiellement dues aux contraintes d'utilisation dans chacun des domaines.

2.1.2 Contraintes liées aux applications médicales de la tomographie

Les principales contraintes imposées par les applications médicales sont de deux types :

- minimisation de la dose reçue par le patient lors d'un examen ;
- immobilité du patient.

■ Minimisation de la dose reçue par le patient lors d'un examen

Cette contrainte impose des durées d'exposition très courtes et l'utilisation d'une source de photons X fonctionnant avec une tension accélératrice maximale de 140 kV délivrant des photons d'énergie moyenne de 80 keV environ. Ces paramètres sont tout à fait compatibles avec la nature peu absorbante des milieux traversés essentiellement constitués d'eau et dont la densité avoisine $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^3$. Ces tomographes sont dits « basse énergie ».

La convention en imagerie médicale est de normaliser les coefficients d'absorption linéaires mesurés μ_m par rapport à celui de l'eau μ_{eau} . Les coefficients d'absorption linéaires ainsi obtenus sont exprimés en **unités Hounsfield UH** ou **nombre CT** suivant l'expression :

$$CT = 1000 \frac{\mu_m - \mu_{\text{eau}}}{\mu_{\text{eau}}}$$

Dans cette échelle le nombre CT de l'eau, pris comme référence, est 0, celui de l'air 1 000 UH et celui des tissus humains les plus absorbants (les os) + 1 000 UH. L'ensemble des milieux rencontrés dans le domaine médical excédant rarement cette fourchette, la plupart des scanners médicaux ont une possibilité d'affichage de 3 000 UH à 4 000 UH avec une sensibilité de 1 UH.

La rapidité des examens tomographiques (de l'ordre de quelques secondes par coupe) est obtenue grâce à un nombre élevé de détecteurs (souvent 1 024). Pour tenir compte des différences même minimales existant entre les réponses de ces multiples détecteurs, on étalonne l'instrument à partir de l'image d'un cylindre rempli d'eau.

Le domaine des applications médicales du scanner concerne pratiquement toutes les parties du corps humain avec une résolution de l'ordre de 0,5 mm environ pour la localisation de tumeurs éventuelles ou le diagnostic de malformations accidentelles ou permanentes. La tomographie à rayons X est un outil d'investigation très général qui n'est supplanté ponctuellement que par quelques autres techniques et pour des investigations très spécifiques (§ 4).

■ Immobilité du patient durant l'examen

Le lit de contention doit rester strictement immobile, ce qui conduit à réaliser une rotation (rotation translation, dans certains cas) du couple source-détecteur. Dans le cas d'examens dans la région cardiaque, la durée habituelle de prise de mesure des coupes est encore réduite pour éviter les distorsions des images restituées qui seraient associées aux battements du cœur. Les temps de prise d'information à la réalisation des coupes tomographiques sont de l'ordre de la fraction de seconde [22].

2.1.3 Contraintes de la tomographie industrielle

Par rapport à la tomographie médicale, la tomographie industrielle présente l'avantage de ne pas subir les contraintes relatives à la minimisation des doses. De même, la pièce expertisée lors d'un examen industriel peut, le plus souvent, subir des rotations rapides sur elle-même sans préjudice. Il en découle directement

que les installations conçues dans une finalité industrielle sont basées sur une configuration géométrique où source de rayonnement X et détecteurs restent fixes alors que la pièce, montée sur un plateau circulaire horizontal, tourne dans le champ autour d'un axe vertical (figure 8).

L'avantage d'une telle configuration est indéniable sur le plan mécanique et nécessite une maintenance et des réglages légèrement moins pointus que dans les configurations médicales.

La grande diversité des matériaux rencontrés dans le domaine industriel (des mousses très faibles densités jusqu'aux fûts de propergol) et la panoplie infinie des géométries de pièces pouvant aller de l'échelle centimétrique, voire millimétrique, jusqu'à des dimensions de plusieurs mètres (pièces aéronautiques par exemple) nécessitent une gamme bien plus étendue du nombre CT que la gamme utilisée en tomodensimétrie médicale (tableau 1). Compte tenu des différents ordres de grandeur des coefficients d'absorption des pièces observables, les dimensions L de celles-ci peuvent effectivement varier énormément ; la restitution d'une image composée de $n \times n$ pixels ou de $n \times n \times n$ voxels (éléments de volume) avec une valeur de n , ajustable, pouvant aller jusqu'à 1 024 se fait avec une résolution égale à L/n . Pour accorder cette résolution à celle définie par la taille de la source et du détecteur [expression (4)] et surtout à celles définies par l'épaisseur de la coupe et par le pas de mesure en translation, les hauteurs de coupe et la largeur de collimation des tomographes industriels sont en général ajustables (entre une fraction de millimètre et plusieurs millimètres). De même, les détecteurs doivent posséder une dynamique de mesure très élevée (10 000-100 000) pour pouvoir traiter le maximum de cas. Enfin, leur temps de réponse doit être suffisamment court pour pouvoir absorber les variations brutales du coefficient d'absorption pouvant survenir au cours des translations.

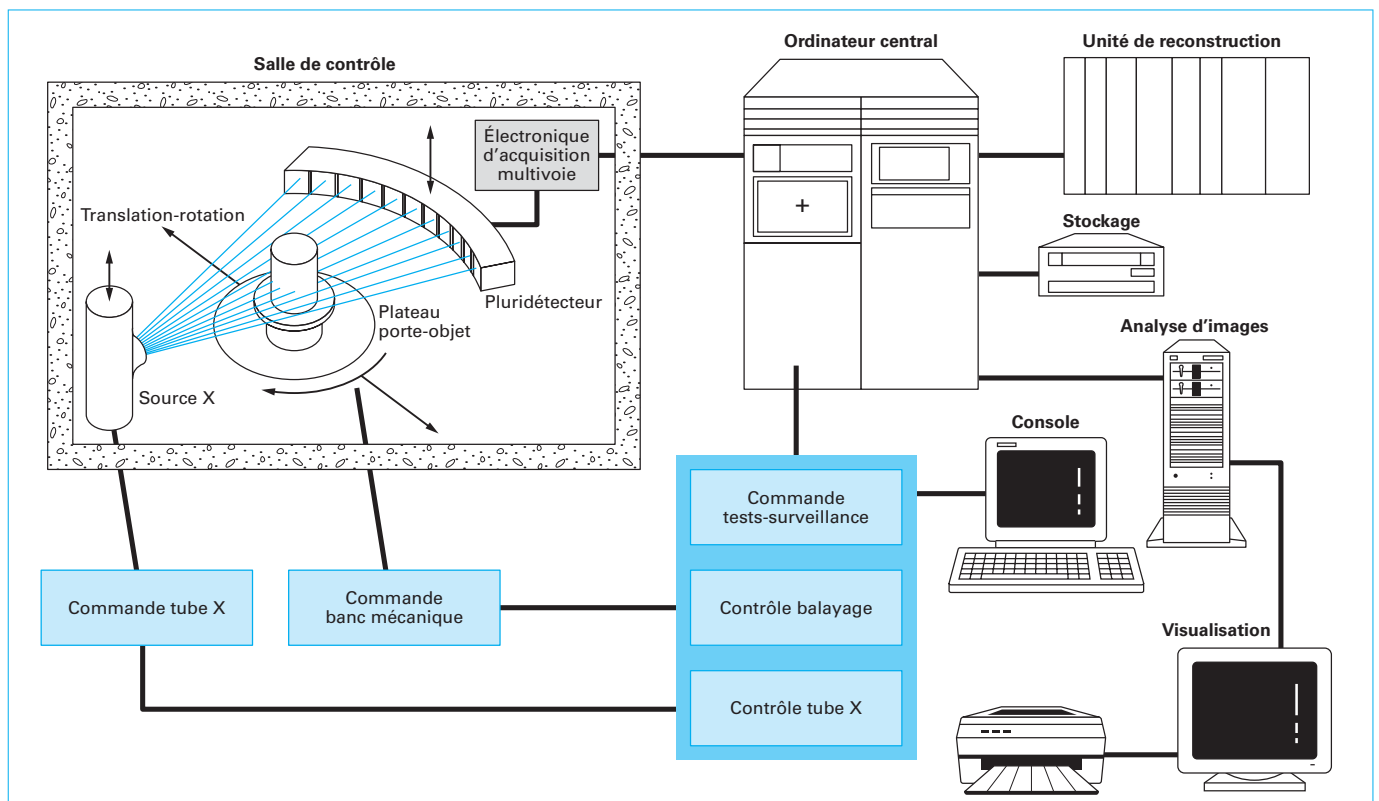


Figure 8 – Constitution d'un tomographe industriel à rayons X (TIX)

2.1.4 Architecture d'un tomographe industriel à rayons X (TIX)

La réalisation générale des tomographes à vocation industrielle (figure 8) est donc articulée autour de deux grands ensembles principaux : le système d'acquisition des données et le système de reconstruction (ou réformation) et d'analyse des images. Pour répondre aux attentes des utilisateurs, ces systèmes s'inscrivent dans une conception modulaire qui donne beaucoup de souplesse aux installations [12].

2.1.4.1 Système d'acquisition

Le rôle du système d'acquisition est d'effectuer la saisie et le prétraitement des mesures d'atténuation, indispensables à la reconstruction de la coupe.

Il se compose :

- du générateur de rayonnement X ;
- du banc mécanique de positionnement et de balayage de l'objet ;
- de l'ensemble de détection associé à l'électronique de numérisation.

Un ordinateur de gestion permet d'exécuter les programmes d'animation, de contrôle et de dialogue avec l'utilisateur. Le banc mécanique assure le balayage de la pièce dans le faisceau de mesure et le positionnement en z du plan de coupe.

Le positionnement du support de l'objet nécessite une grande précision suivant l'axe de translation où s'effectue la mesure. En particulier, le centre de rotation doit être parfaitement connu. Son réglage passe par un alignement minutieux du faisceau de rayons X.

C'est le banc mécanique qui apparaît comme l'élément le plus variable d'un tomographe. C'est en effet sur lui que l'on fait porter les contraintes spécifiques du contrôle à effectuer. Ses paramètres (diamètre du plateau, hauteur des courses, poids) dépendent directement du type et de la nature des pièces à examiner.

2.1.4.2 Système de reconstruction et d'analyse des images

Le système de reconstruction et d'analyse des images met en œuvre l'algorithme de reconstruction avec une rapidité et une précision suffisantes c'est-à-dire, en temps réel (affichage à l'écran en quelques secondes avec une résolution minimale de 512×512), pouvant atteindre jusqu'à $2\,048 \times 2\,048$ dans le domaine médical.

Il se compose :

- d'un ordinateur de moyenne puissance ;
- de périphériques standard (console, disque optique, bande magnétique...);
- d'une unité plus spécifique dédiée à la reconstruction d'images ;
- d'une unité de visualisation et/ou d'analyse d'images équipée d'un terminal couleur.

L'utilisation de la couleur sur les terminaux offre de grandes possibilités au niveau des documents, mais peut s'avérer une gêne pour l'interprétation dans le cas de l'appréciation de phénomènes discrets tels que des défauts. En effet, il ne faut pas perdre de vue que l'œil humain perçoit mieux les contrastes des palettes en noir et blanc [39].

Aujourd'hui, des solutions purement logicielles tendent à remplacer les associations ordinateur – cartes spécialisées de jadis pour effectuer ces reconstructions. Elles permettent d'accéder à des temps de reconstruction tout à fait acceptables.

2.2 Performances en matière de résolution

L'extension de l'utilisation de la tomographie dans le domaine industriel, notamment avec l'arrivée sur le marché de nouvelles machines, et la gamme très étendue des interactions rayonnement/matière, a nécessité la mise en œuvre d'une réflexion de spé-

cialistes et utilisateurs de la technique (groupe de travail créé en 1996 à la Confédération française pour les essais non destructifs COFREND) afin d'en définir et cerner ses performances en matière de résolution.

Ce travail a permis de créer un groupe CEN (CEN/TC138/WG1) à l'échelle européenne sous la direction de AFNOR et de déboucher au dépôt en 2008 de quatre normes en tomographie dans lesquelles sont validées les méthodes de mesure de la résolution initiées par le groupe COFREND.

NF.EN16016-1 Essais non destructifs – méthode par rayonnements – tomographie informatisée/Partie 1 : Terminologie

NF.EN16016-2 – Partie 2 : Principes, équipements et échantillons

NF.EN16016-3 – Partie 3 : Fonctionnement et interprétation

NF.EN16016-4 – Partie 4 : Qualification

Les performances comparées des éléments de quelques types génériques de chaînes tomographiques recensées en France sont données dans le tableau 2.

2.2.1 Résolution spatiale et résolution en densité

Les améliorations obtenues depuis quelques années dans la mise en œuvre des détecteurs (détecteurs plans *flat panel*) et les développements nombreux vers les installations hautes résolutions de microtomographie (§ 2.3.2) et très hautes résolutions de nanotomographie ont permis d'atteindre des résolutions de plus en plus fines.

On parle aujourd'hui de performances en **résolution spatiale** allant de 10 μm pour les installations hautes résolutions de microtomographie (§ 2.3.2) à 1,4 mm pour les accélérateurs linéaires de très haute énergie.

La résolution moyenne des appareils industriels de haute énergie (énergie maximale allant de 420 kV à 600 kV) varie de 50 μm à 300 μm selon le type de contrôle et de pièce examinée.

La **résolution en densité** (appelée aussi *résolution en opacité*) peut varier selon le cas de 0,2 % pour du propergol solide avec un accélérateur haute énergie, à 3 % maximum dans les cas les plus défavorables correspondant à des mesures par microtomographie (avec une énergie du faisceau incident de 150 keV).

Globalement, cette résolution varie entre 0,5 % et 1 % pour les appareils haute énergie (TIX) mais peut diminuer jusqu'à 0,1 % si le contrôle s'assortit d'une phase d'étalonnage de précision.

2.2.2 Notion de bruit, analyse des influences et remèdes

Résolution spatiale et résolution en densité dépendent fortement du rapport signal sur bruit, c'est-à-dire de la statistique de comptage. Cette statistique de comptage peut être améliorée soit en augmentant simplement le temps d'acquisition, soit en améliorant le pouvoir d'arrêt (efficacité de détection) des détecteurs, soit en réduisant le rapport rayonnement diffusé sur signal. Ce dernier point est obtenu par des collimations du faisceau et la mise en œuvre de techniques alliant comptage et mesure spectroscopique des photons détectés.

Minimiser l'écart entre la « valeur mesurée » et la « valeur vraie » nécessite d'intervenir à plusieurs niveaux :

- les écarts systématiques sont corrigés par étalonnage avec une référence connue ;
- les dérives peuvent être annulées en asservissant les paramètres indirects pouvant avoir une influence sur le fonctionnement de l'instrument (température, tension d'alimentation...) et en surveillant le vieillissement des composants ;
- les **fluctuations aléatoires (bruit)** dont on souhaiterait réduire l'amplitude en vue d'obtenir l'instrument « idéal », proviennent de paramètres insuffisamment asservis, qui peuvent être cachés (défauts d'isolation, parasites) et qui sont des dérives de haute fréquence de moyenne nulle, qu'il est possible d'annuler « en y mettant le prix » (fabrication mieux maîtrisée, précautions d'emploi).

Tableau 2 – Performances comparées des éléments de quelques types génériques de chaînes tomographiques recensées en France

Dispositif caractéristiques	Microtomographie	Haute énergie	Large volume	Très haute énergie	Médical
Type d'appareil	2 ^e génération	2 ^e génération	2 ^e génération	2 ^e génération	3 ^e génération
Générateur X					
Taille foyer	10 à 20 µm	1 à 4,5 mm	1,5 à 3,5 mm	2 mm	1,2 mm
Haute Tension utile	100 à 200 kV	100 à 450 kV	100 à 420 kV	2 à 6 MV et 8 MV	80 à 130 kV
Intensité maximale	0,4 mA	10 mA	3,5 mA	Mode pulsé	100 mA
Filtration additionnelle	Cuivre 0 à 1 mm	Cuivre ou aluminium 0 à 5 mm	Cuivre 0 à 5 mm	Acier 3 à 30 mm	Cuivre ou aluminium
Épaisseur maximale examinable (à tension utile maximal) :					
• Aluminium	80 mm	340 mm	320 mm	1 500 mm	40 mm
• Acier	40 mm	120 mm	100 mm	300 mm	5 mm
Détecteurs X					
Type	Scintillateur : BGO	Scintillateur : BGO	Scintillateur : BGO	Semi-conducteur : CdTe	Gaz : xénon
Nombre/Type	31 + 1/linéaire	31 + 1/linéaire	31 + 1/linéaire	25/linéaire	1 024 + 11/linéaire
Hauteur de coupe typique	0,2 à 0,8 mm	0,6 à 7 mm	2 à 10 mm	1 à 15 mm	1,5 à 10 mm
Résolution spatiale	40 µm	100 à 300 µm	≈ 300 µm	1,4 mm	1,2 pl/mm à 10 %
Efficacité	99 % à 200 keV	99 % à 200 keV	99 % à 200 keV	40 % à 4 MeV	65 % à 80 keV
Dynamique de mesure	≈ 10 ⁵	≈ 10 ⁵	≈ 10 ⁵	≈ 10 ⁵	codage sur 12 bits
Géométrie					
Champ d'acquisition (diamètre maximal)	80 mm	500 mm	2 400 mm	500 mm	420 mm
Temps moyen d'acquisition	Variable : ≈ 15 min pour 775 projections	Variable : 3 à 30 min pour 775 projections	Variable : ≈ 1 h pour un objet de 2 000 mm de diamètre	≤ 5 min pour 1 125 projections	3,4 à 13,6 s pour un tour
Pièce maximale :					
• Hauteur / diamètre	220 mm/80 mm	1 000 mm/500 mm	6 000 mm/2 300 mm	500 mm/500 mm	1 000 mm / 520 mm
• Masse	2,3 kg	50 kg	3 000 kg	50 kg	200 kg
Reconstruction					
Temps	60 s en ligne/2 min pour image 1 024 × 1 024 et 775 projections	60 s en ligne/2 min pour image 1 024 × 1 024 et 775 projections	60 s en ligne/4 min pour image 1 024 × 1 024	5 min pour 1 125 projections image 1 024 × 1 024	10 s pour 1 024 projections et image 512 × 512
Taille du pixel	programmable de 10 µm à 2,5 mm	programmable de 10 µm à 2,5 mm	programmable de 10 µm à 2,5 mm	programmable de 100 µm à 2,5 mm	0,2 à 0,8 mm selon la valeur de champ
Mesures					
Résolution en densité	1 à 3 %	0,5 à 1 %	1 % typique 0,1 % si étalonnage	0,2 % sur propergol solide	< 1 % sur densité de 0,5 à 2 g/cm ³
Précision dimensionnelle typique	± 40 mm	± 50 µm	≈ 0,1 à 0,3 mm	≈ 0,3 mm	≈ 0,2 à 0,3 mm

Notes du tableau 2

BGO germanate de bismuth ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$).

pl/mm à 10 % : paires de lignes à 10 % de l'énergie maximale. On utilise dans ce cas des mires formées de paires de lignes (fils absorbants) plus ou moins espacées et on mesure le pouvoir résolutif de l'appareil par la possibilité de voir distinctement la séparation de ces lignes. Plus un appareil est résolutif, plus il a de facilité à distinguer des lignes très voisines. Les bons appareils arrivent à des résolutions de 4 à 5 pl/mm.

Efficacité : pouvoir d'arrêt.

Dynamique de mesure : elle correspond à un facteur de densités optiques. L'échelle des densités étant logarithmique, un détecteur de 5 décades mesure avec une bonne résolution des densités optiques de 1 (blanc) à 5 (noir) et étale sa dynamique de couleurs (ou de gris) entre ces deux extrêmes.

Temps de reconstruction : temps de calcul nécessaire pour afficher une image reconstruite.

Temps de ligne : temps total entre le lancement d'une coupe et l'arrivée de l'image à l'écran. Le calcul de l'image s'effectue dès que les premières acquisitions sont faites. Il s'oppose au temps en différé, beaucoup plus long, pour lequel le calcul débutait après les séquences d'acquisition.

2.2.2.1 Analyse du bruit

Toutefois, il existe un bruit irréductible, le **bruit quantique ou de grenaille**, dû à la double nature onde/particule de la matière et du rayonnement, lesquels se manifestent sous forme de « grains » et interfèrent comme des ondes. L'électricité, la lumière, les rayons X, ont cet aspect granulaire : la charge électrique ou l'énergie du rayonnement électromagnétique sont multiples d'une quantité minimale élémentaire (quantum). La fonction de répartition des grains (mesurée) fluctue ainsi autour d'une densité moyenne (carré du module de l'onde). La loi statistique représentant cette fluctuation est une loi binomiale, très bien représentée à partir de trois ou quatre particules par la loi de Poisson (cf. [A 165] *Probabilités*). Selon cette loi, la variance (le « bruit » au carré) est égale à la moyenne (signal), d'où la formule :

$$\sigma = \sqrt{N} \tag{5}$$

avec σ écart type du bruit,

N nombre moyen de particules mesuré par voie (ou pixel).

Si le rapport signal sur bruit augmente, le signal croît nécessairement, mais le bruit également (cependant moins vite que le signal).

Dans un équipement bien conçu, seuls ces derniers phénomènes fixent les limites de détection.

Le bruit se caractérise donc par une dispersion des valeurs des pixels de l'image appartenant à une plage normalement homogène en densité (donc en éclaircissement).

Les constructeurs prétendent que des écarts de densité de l'ordre du centième, voire du millième, sont décelables. Une analyse plus détaillée permet de constater que cela est vrai dans les cas les plus favorables qui concernent des échantillons binaires constitués de précipités de métaux lourds dans des matrices peu absorbantes (hétérogénéités abruptes) mais que des gradients de composition affectant des éléments légers et plus ou moins uniformément distribués sur toute la coupe sont plus difficiles à déceler (hétérogénéités diffuses).

De façon plus précise, il faut signaler que la procédure de reconstruction amplifie d'un coefficient ω le bruit dans l'image restituée par rapport au bruit statistique relatif à chaque acquisition (projection de Radon § 1.3) car la tomographie, opération inverse de la projection, « dérive » le signal.

Le coefficient d'amplification ω est tel que :

$$\omega \approx \left(B \frac{\Phi}{\Delta x} \right)^{1/2}$$

avec B coefficient numérique de l'ordre de l'unité,
 Φ diamètre de l'échantillon,
 Δx résolution obtenue.

Exemple

Pour un nombre de pixels ($\Phi/\Delta x$) égal à 256, $\omega \approx 15$, cela implique que, si l'on souhaite une précision de l'ordre de 1 % sur la reconstruction de l'image, le bruit statistique relatif à une acquisition donnée doit être inférieur à 1 %. Cette condition s'avère très contraignante sur le temps d'acquisition puisque le rapport signal sur bruit est $\sqrt{N_D} = 1000$, soit $N_D = 10^6$ photons « détectés » par pixel.

On note ici l'intérêt de détecteurs de haut pouvoir d'arrêt (détecteurs HPA), permettant d'optimiser l'efficacité de détection, ce qui suppose en pratique que l'amplitude du bruit « interne » par voie de mesure soit inférieure à l'amplitude du bruit quantique.

Le bruit est également dû, mais à moindre échelle, à la numérisation et aux algorithmes de traitement ou de reconstruction. C'est un phénomène inhérent à la mesure.

Le rapport bruit sur signal peut donc être minimisé en agissant sur tout ce qui permet d'améliorer la statistique de détection du signal utile c'est-à-dire :

- en réduisant la proportion de signal diffusé parasite (en améliorant la sélectivité angulaire des collimations (figure 9) et sélectivité en énergie du détecteur en mode compteur) ;
- en augmentant le nombre de photons détectés par voie ou pixel (augmentation de la dose machine, diminution de la distance source - détecteur, réduction des épaisseurs de filtres au strict nécessaire, accroissement du temps d'acquisition, en élargissant la collimation si cela ne conduit pas à augmenter la proportion de signal diffusé).

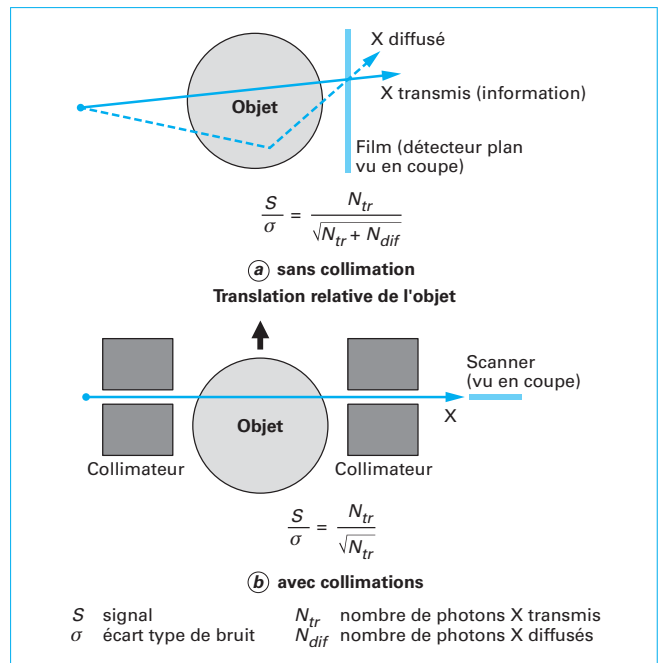


Figure 9 – Effets du bruit dû au rayonnement diffusé parasite

Ces moyens sont cumulables.

Le rapport signal sur bruit n'est cependant pas le seul facteur jouant sur la performance globale. Pour un flux de photons détectés donné au niveau du détecteur (influant directement sur la statistique), la taille du foyer de rayons X, le grandissement, le pas d'échantillonnage angulaire en acquisition et la taille de l'image reconstruite (valeur ou dimension du pixel) sont des paramètres jouant sur la résolution spatiale.

2.2.2.2 Bruit et résolutions

L'approche suivante que l'on doit à **Brooks et Dichiro** [45] est très intéressante à étudier. Elle est résumée par la formule :

$$\sigma = \alpha \left(\frac{1}{w^3 h D} \right)^{1/2} \quad (6)$$

- avec D dose,
- h épaisseur de coupe,
- w dimension du plus petit objet discernable (pas d'acquisition),
- α facteur de qualité spécifique de la machine utilisée, qualifiant sa mécanique et son électronique.

Cette formule met en évidence toute la difficulté de trouver en tomographie les conditions les meilleures possibles selon les objectifs que l'on se fixe et qui sont dans tous les cas issus de compromis.

Pour accéder à une bonne résolution spatiale, il faut diminuer le pas d'acquisition w et l'épaisseur de coupe h , mais qu'alors on augmente sensiblement le bruit σ qui varie comme l'inverse de la racine carrée de w^3 et de h , d'après la relation (6).

La **résolution en densité** est caractérisée par la déviation standard δ exprimant le plus petit écart appréciable entre deux zones de densité.

Elle dépend, suivant une autre formule de **Brooks et Dichiro**, de la dimension p du pixel en millimètres, de l'épaisseur h de la coupe, du niveau moyen μ de densité de l'image et du facteur α de qualité spécifique de la machine utilisée :

$$\delta = \mu \frac{\alpha}{\sqrt{D h p^3}}$$

Pour un flux de rayons X fixé (photons X/mm²), plus le pixel est petit, moins les photons détectés sont nombreux et plus le « bruit quantique » augmente suivant la dégradation de la statistique [relation (5)]. Cela a pour résultat de dégrader la **résolution spatiale** effective du capteur d'image qui n'est plus la pleine largeur à mi-hauteur (cas limite idéal) mais la pleine largeur au n^e de la hauteur avec $n > 2$ (2 définissant l'intervalle de confiance).

La relation entre la résolution spatiale et le bruit s'écrit [41] :

$$n = \frac{2 \frac{S}{\sigma}}{\left(\frac{S}{\sigma} - 2 \right)} \quad \text{où} \quad \frac{S}{\sigma} = \sqrt{N_i \eta p^2}$$

- avec N_i (photons/mm²) flux de photons incidents,
- η pouvoir d'arrêt du capteur (section efficace macroscopique),
- p (mm) largeur du pixel,
- S signal,

le facteur 2 signifiant que l'on a choisi ici un intervalle de confiance à 2σ .

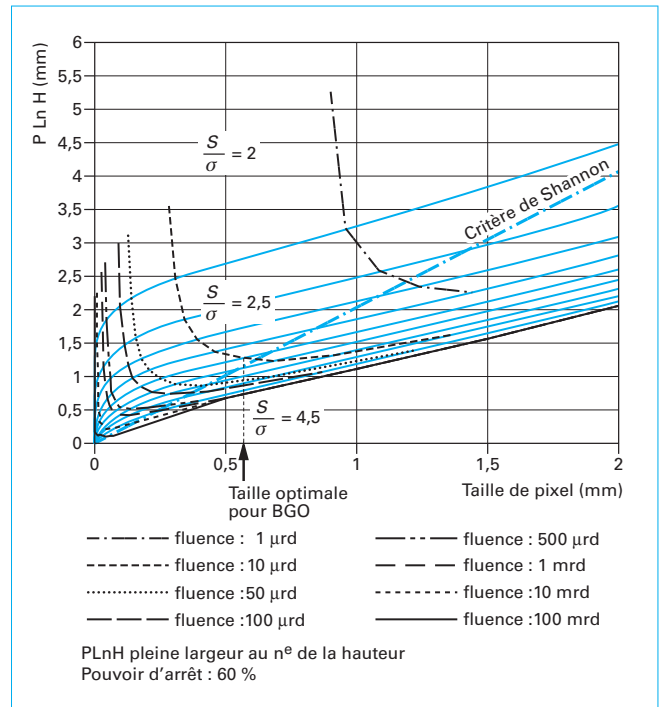


Figure 10 – Résolution spatiale en fonction de la largeur du pixel et de l'efficacité de détection

Si le contraste, défini par $C = (S - S_0)/S$, où S représente le signal total et S_0 le fond, est inférieur à 1, cette relation devient :

$$n = \frac{2C \sqrt{N_i \eta p}}{C \sqrt{N_i \eta p} - 2}$$

Du point de vue de la résolution spatiale, une dégradation du contraste équivaut donc à une plus faible efficacité de détection ou à un flux incident disponible plus petit, et en tout cas, à un bruit plus élevé, ce qui a des répercussions importantes sur le choix du détecteur et sur la qualité des mesures. Ces considérations statistiques (pouvoir d'arrêt, bruit, contraste) conduisent à l'existence d'un optimum (figure 10) pour la dimension du pixel, qui dépend du flux de photons X à détecter. L'optimum [42] [43] est légèrement déplacé en tenant compte du théorème de Shannon (fréquence limite de Nyquist) sur le pas d'échantillonnage (longueurs d'onde spatiale situées au-dessus de la droite).

Rappelons que le pouvoir d'arrêt est la perte moyenne d'énergie d'une particule par distance parcourue, en MeV/cm.

2.2.3 Artefacts en tomographie

La bonne qualité des images produites en tomographie est indispensable pour accéder à une reconstruction la plus exacte possible des objets et il est déterminant de pouvoir s'affranchir au maximum de toutes les perturbations de celles-ci, qu'elles soient dues aux paramètres des éléments de la chaîne, aux conditions d'acquisition ou aux objets expertisés. Ces perturbations sont appelées **artefacts** et sont citées de façon non exhaustive ci-après (figure 11) [51].

Les variations du **durcissement du faisceau** (*Beam hardening*) (parties plus ou moins absorbantes de l'objet traversé) influencent



Figure 11 – Visualisation de quelques artefacts couramment rencontrés en tomographie [51]

de façon très importante le flux incident au niveau du détecteur, et donc la résolution en densité, en raison des variations concomitantes du coefficient linéique d'absorption μ des matériaux. Sur une rotation complète, les épaisseurs de matière traversée ne sont pas identiques et il peut y avoir dans le cas d'objets très denses ou très absorbants, des projections où l'on note des saturations qui accroissent certains niveaux de gris de façon artificielle (figure 11a). Lors de l'interaction rayonnement-matière, les composantes chromatiques du rayonnement les plus faibles sont atténuées plus rapidement que les autres, ce qui introduit une modification de l'interaction avec la matière lors de l'acquisition des données. Le résultat de ce phénomène se traduit par une

variation de la densité optique sur l'image reconstruite dite « **effet cuvette** » (**cupping effect**). Les solutions pour corriger cet effet sont de plusieurs types :

- incorporation de filtres métalliques qui provoquent le durcissement du faisceau avant l'entrée dans le matériau, ce qui peut être également réalisé avec des matériaux divers comme un casque d'eau ou du plâtre (domaine médical) ou des pièces « papillon » complémentaires des pièces contrôlées. Ces pièces sont aussi utilisées dans le cas de pièces à angles vifs pour éviter les artefacts de « traits de travers » (voir ci-après) ;
- correction par traitement numérique et remise à plat.

Les erreurs de **parallaxe**, qui, si la divergence du faisceau ne peut pas être négligée, doivent être compensées en utilisant un algorithme de tomographie qui en tienne compte.

Les **artefacts en anneaux** (figure 11b) appelés souvent « *ring artefact* » sont dus à la présence, dans la matrice des pixels, de pixels « morts » provoquant une perte locale d'information se traduisant par une mauvaise interprétation des données par l'algorithme de reconstruction, ce qui conduit à un effet circulaire centré sur le centre de rotation de la pièce examinée. On peut les détecter en réalisant deux images de champ sans objet avec intensité différente. Une fois détectés, on leur donne une valeur obtenue soit par lissage à l'aide d'un filtre médian, soit par interpolation avec les valeurs des pixels les plus proches.

Les **variations de gain** [48] sont dues au fait que les pixels du détecteur ont des réponses différentes à un même flux incident. S'il arrive que le circuit de lecture donne une amplification différente à chaque ligne de pixels traités, la variation de signal de plein flux peut atteindre 6 %. Pour s'en affranchir, il faut évaluer la réponse en gain du détecteur en utilisant une image de plein flux (dite de blanc), obtenue en l'absence d'objet et à un flux d'émission (hors saturation) maximal.

Le **courant d'obscurité** [48] est un courant de fuite faible dans les photodiodes qui se manifeste par un signal léger en l'absence totale d'émission de photons. Il constitue un bruit dont la valeur moyenne peut être mesurée par l'intégration de plusieurs images effectuées sans émission. L'image moyenne ainsi obtenue (appelée « image d'offset ou de noir ») doit être soustraite lors des acquisitions sous flux.

Les **floos d'image** sont des artefacts liés au rayonnement diffusé (figure 11c). Pour s'en affranchir, on utilise des collimations secondaires de type grille que l'on place entre l'objet et les détecteurs.

Les **instabilités du foyer d'émission** du rayonnement X peuvent provoquer des décalages d'images et donc des dédoublements d'objets lors de la rétroprojection.

Les **artefacts dus à la rémanence du détecteur** s'apparentent à des effets de mémoire brouillant les images tels des floos, et souvent dus à des vieillissements de tout ou une partie des composants d'un détecteur sous l'effet du rayonnement (par exemple, le noircissement du verre au plomb d'une caméra à scintillateur).

Les **artefacts dits « traits de travers »** peuvent être dus à des effets de pointe (angles vifs ou inclusions fines et absorbantes dans les pièces) (figure 11d) et à des effets d'ombre (sous densification apparente locale inhérente aux effets de pointe). Une action logicielle et la mise à plat à l'aide de « blancs » de référence peuvent les corriger totalement ou en minimiser les effets.

Les **artefacts apparents de visualisation** sont des artefacts indépendants de l'acquisition et dus à une mauvaise visualisation des images (choix des fenêtres de visualisation inadapté, LUT de couleurs). Ils conduisent à une interprétation erronée de celles-ci. On peut les éviter par un réglage attentif de ces paramètres de visualisation adapté à chaque image reconstruite et à la prise en compte des informations connues sur les pièces contrôlées (matériaux, zones spécifiques, géométrie, informations sur les fabrications et connaissance par le fabricant des éventuels « avatars » de fabrication).

Enfin, les **artefacts de traitement** peuvent également induire des erreurs dans les valeurs de la densité reconstruite si certaines conditions ne sont pas respectées (le nombre de directions de projection k doit être égal au nombre de pixels ($n = \Phi/\Delta x$) contenus dans une coupe projetée).

Nota : LUT pour Look Up Table (table de conversion)

2.2.4 Améliorations de la détection : nouveaux détecteurs

2.2.4.1 Techniques d'imagerie

Les techniques d'imagerie tomographique sont en évolution rapide, notamment au niveau médical. Les mots-clés en sont **résolution** et **rapidité**, ce qui implique sensibilité et seuil de détection très bas. Parallèlement, le besoin en résolution spatiale demande une résolution en énergie pour rejeter le rayonnement diffusé (cas des détecteurs fonctionnant en « compteur ») en vue d'améliorer la détection et la résolution spatiale des zones de faible contraste.

L'interaction entre un photon X et le matériau du détecteur se caractérise par une section efficace (probabilité) d'interaction et un dépôt d'énergie qui a lieu dans un volume de dimensions non négligeables. L'absorption du photon incident met en mouvement une cascade de particules secondaires contenant :

- des électrons rapides (§ 1.1) (effet photoélectrique, effet Compton, création de paires) ;
- des photons diffusés (diffusion Compton, *Bremsstrahlung*, cf. [P 2 625] *Analyse de surface par ESCA – Principe et instrumentation*).

Le nombre d'interactions dans le détecteur dépend de la quantité de matière disposée sur le trajet des rayons X et la résolution spatiale du détecteur dépend de la dimension de la forme en « poire » du dépôt d'énergie. Le besoin en sensibilité nécessite donc d'accroître l'épaisseur des détecteurs, et la cascade de dépôt d'énergie peut alors atteindre sa dimension latérale maximale sans limitation.

Or, le seuil de détection d'un équipement bien conçu est fixé par la statistique de nature quantique du rayonnement détecté (un tel instrument peut être dit « quantique »). Cette condition est remplie si le bruit « interne » du capteur est inférieur à l'amplitude de signal due à une seule particule détectée (le photon X unique). Il peut alors servir à **compter les photons (compteur)**. Dans ce cas, il est possible de mesurer leur énergie « individuellement », voire d'analyser temporellement le front de montée du signal pour chaque photon individuellement (spectromètre) ou encore d'enregistrer la « forme » de la tache de dépôt d'énergie, ce qui permet, en mode « compteur » exclusivement, de rejeter les photons diffusés de basse énergie (seuillage en énergie) et de préciser les coordonnées du point d'interaction du photon X (barycentre de la tache, méthode du centroïde).

Lorsqu'à cause d'un débit de dose trop important, on doit intégrer l'énergie totale des photons ayant atteint les pixels, l'imager travaille en « dosimètre sensible à la position ». Dans ce cas, pour améliorer le compromis « sensibilité – résolution », il faut mettre en œuvre des techniques spécifiques. Pour réduire le rayonnement diffusé, on utilise alors des **collimations très sélectives en direction** : matrice de trous de collimation visant la source X. Il faut ensuite lire localement l'énergie déposée dans le volume de détection épais : structuration matérielle du matériau du détecteur, « feuilletée » ou « fibrée » par analogie avec les fenêtres constituées d'un faisceau de fibres optiques qui guident la lumière. Les pixels « fibres » du capteur remédient de la sorte à l'étalement latéral qui se produirait au détriment de la résolution spatiale dans un détecteur épais non segmenté. On sait aujourd'hui tailler des **cristaux scintillateurs de BGO** en aiguilles de 4 cm de long et de 0,6 mm de section carrée, et assembler ces cristaux.

Les techniques de l'imagerie numérique bénéficient aussi des progrès constants en matière d'électronique, d'informatique et de nouveaux matériaux. Les évolutions dans la constitution des détecteurs furent pour l'essentiel des retombées directes de la physique des particules. Cette discipline a contribué à rendre les détecteurs plus performants, plus rapides, plus compacts, directement numériques et donc d'utilisation plus facile et à les intégrer dans des appareillages plus légers et moins volumineux. Pour finir, ces détecteurs fournissent aujourd'hui une qualité d'image bien supérieure pour une dose réduite de plus d'une décennie.

Face aux détecteurs plus anciens qui reposaient sur le principe de la conversion indirecte (scintillation puis détection de la lumière), des **détecteurs semi-conducteurs épais de type CdTe (tellure de cadmium)**, à conversion directe, permettant d'augmenter d'un facteur 10 environ le nombre de charges collectées par interaction, ont été développés. C'est grâce aux progrès obtenus dans leur réalisation (on peut atteindre des surfaces de plus de 10 cm^2) qu'ils ont contribué à développer toutes les techniques de contrôle à basse énergie utilisées dans le domaine médical (mammographie, dentaire, obstétrique). En effet, ils ont l'avantage de présenter une incomparable résolution de l'énergie. La création des paires électron-trou est facilitée, ce qui les rend 10 fois plus sensibles que les détecteurs à gaz et 100 fois plus sensibles qu'un scintillateur. Cette meilleure résolution d'énergie vient du fait que la fluctuation des charges collectées est moins importante avec, pourtant, davantage d'ionisations primaires. Ils présentent d'excellentes linéarités dues au fait que le seuil de perte d'énergie est très faible. Ils sont très rapides puisque le temps d'arrivée des charges induites est de l'ordre de quelques nanosecondes.

2.2.4.2 Gamma caméra à scintillateur

La gamme caméra à scintillateur segmenté utilise un scintillateur dense découpé en fines aiguilles afin de préserver l'information spatiale. La scintillation se propage dans chaque aiguille (qui joue le rôle de guide de lumière) pour être enregistrée à sa sortie par un capteur sensible à la lumière comme, par exemple, un film ou un dispositif de transfert de charge CCD (*Charge Coupled Device*).

On peut utiliser les scintillateurs sous forme de poudre agglomérée dans un liant, sous forme de dépôts d'aiguillettes en couche mince (CsI, NaI...), sous forme de fibres (plastiques, verres scintillants) ou sous forme de scintillateurs cristallins taillés.

Le principal inconvénient des imageurs radiographiques à scintillateur cristallin segmenté réside dans leur coût car ils nécessitent la découpe et l'assemblage minutieux de très nombreux éléments. Par ailleurs, il est difficile d'obtenir un assemblage parfaitement régulier et dont la sensibilité ne varie pas trop d'un segment à un autre. La correction de ces défauts implique la mise en œuvre de traitements numériques de l'image, plus ou moins élaborés, qui induisent une perte supplémentaire sur la qualité de l'image finale (rapport signal à bruit et résolution effective).

Une solution alternative pour réaliser des systèmes d'imagerie radiographiques à haut pouvoir d'arrêt et bien résolu spatialement est de coupler directement un **scintillateur cristallin monolithique dense et (ou) épais** à une caméra CCD au moyen d'un objectif optique. Néanmoins, la technologie de fabrication des cristaux performants (à densité et rendement lumineux élevés) tels que le **BGO** ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$), le **LSO** ($\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$) ou le **LYSO** ($\text{Lu}_{2(1-x)}\text{Y}_2\text{xSiO}_5:\text{Ce}$) ne permet pas de produire des blocs de dimensions suffisantes pour les applications courantes (le besoin typique est de $300 \times 300 \text{ mm}^2$, voire même de $400 \times 400 \text{ mm}^2$). Le LYSO et le BGO, par exemple, peuvent actuellement s'obtenir en blocs présentant un rendement lumineux uniforme et sans aucun défaut majeur jusqu'à des dimensions d'environ $70 \times 100 \text{ mm}^2$ et $80 \times 250 \text{ mm}^2$ respectivement (et, pour des épaisseurs allant jusqu'à 30, voire même 40 mm). Pour réaliser des scintillateurs de grand format (supérieurs à $100 \times 100 \text{ mm}^2$), il est possible d'utiliser des **cristaux de CsI ou de NaI** qui s'obtiennent dans des dimensions typiques de $200 \times 200 \text{ mm}^2$ et $400 \times 400 \text{ mm}^2$ respectivement. Néanmoins, de nombreux défauts sont présents dans ces cristaux et ils sont plus ou moins hygroscopiques. De plus, les performances du dispositif d'imagerie radiographique sont moins bonnes avec des cristaux en CsI ou en NaI qu'avec les cristaux plus denses (tels que BGO, LSO, LYSO).

Les propriétés des principaux scintillateurs denses sont résumées dans le tableau 3.

Pour pallier cette limitation dimensionnelle, le scintillateur peut être constitué d'un assemblage de plusieurs plaques de cristaux scintillants selon une technique spécifique permettant de limiter

l'effet des interfaces sur l'image radiographique : ces nouveaux scintillateurs sont appelés **Crystal Assembly X-ray (CAX) converters** et sont distribués par Saint-Gobain Cristaux. Les gammes caméras équipées CAX converters sont utilisées depuis plusieurs années par le Commissariat à l'énergie atomique CEA sur des générateurs de rayonnement X de haute énergie (multi-MeV) dans le cadre d'expérimentations en détonique et produisent des images de qualité supérieure à celles obtenues avec les générations précédentes d'imageurs en service.

Si nécessaire, on amplifie le flux lumineux émis (par exemple avec une galette de microcanaux) et, afin d'adapter la taille de la matrice de cristaux scintillants au diamètre du tube intensificateur, une réduction géométrique est souvent utilisée. Cette fonction est réalisable par un cône réducteur en fibres optiques ou un objectif à lentilles. Au bout de la chaîne de conversion optoélectronique, la lumière est enregistrée sur un capteur (CCD, CMOS...).

Un imageur à deux dimensions à matrice de cristaux scintillateurs, réalisé au CEA, a permis d'obtenir des images avec des doses inférieures à $10 \mu\text{rad}$. Sa résolution spatiale (largeur à mi-hauteur de la réponse impulsionnelle), de l'ordre de 1,2 mm, a été en 2002 la meilleure parmi les imageurs ultrarapides de haut pouvoir d'arrêt et pouvant fonctionner en mode intégrateur.

Dans le cas d'un capteur linéaire (barrette de scanner), on sait atteindre des performances presque deux fois meilleures en résolution, en réalisant un empilement de plaquettes de cristaux et de lames métalliques denses de $250 \mu\text{m}$ d'épaisseur. La valeur du pixel, obtenue en additionnant l'épaisseur d'une plaquette et d'une feuille de métal (de plomb par exemple), vaut donc $500 \mu\text{m}$ (le rayonnement attaque les plaquettes par la tranche, le plan des plaquettes est perpendiculaire à la direction de la barrette).

2.2.4.3 Matrice de photoconducteur

Le principe de ce détecteur repose sur le phénomène de la photoconduction caractérisé par une forte diminution de la résistance interne sous irradiation. Lorsque la résistivité intrinsèque d'un semi-conducteur est suffisamment élevée (supérieure à $10^{10} \Omega/\text{cm}$), la quantité de charges collectée par les électrodes disposées de part et d'autre du matériau est représentative du signal constitué par les particules ionisantes reçues. Le courant photo-induit augmente linéairement avec le flux d'énergie déposé par le rayonnement incident. Pour obtenir un fort pouvoir d'arrêt, il faut employer un matériau dense, épais et de numéro atomique Z élevé. Le choix peut se porter sur le **silicium** à basse énergie (spécialement vers 70 keV) ou sur le **CdZnTe**, mieux adapté à la haute énergie (de l'ordre du MeV).

La « pixellisation » du matériau peut être réalisée par le biais d'un champ de polarisation établi au moyen d'une matrice d'électrodes qui assurent la mesure locale des charges en conservant la distribution spatiale de l'information en vue de l'imagerie. La disposition des électrodes est la même que sur un détecteur à micropistes. Chaque segment de l'électrode définit, sur une plaquette de photoconducteur, un pixel qui est lu indépendamment grâce à la configuration du champ de polarisation. Un détecteur « bidimensionnel » peut être obtenu en juxtaposant des plaquettes (capteurs linéaires) à électrode segmentée.

Exemple

Un démonstrateur de 2 048 pixels de 1 mm^2 (soit $34 \text{ mm} \times 65 \text{ mm}$) a été réalisé par le CEA. Son seuil de détection, inférieur à $0,5 \mu\text{rad}$, est uniquement dû à la fluctuation statistique des photons X détectés (bruit quantique). Le seuil de saturation est déterminé par la dynamique de l'électronique analogique (dans cet exemple 10 mrad). Sa résolution (pleine largeur à mi-hauteur de la réponse impulsionnelle) est de l'ordre de 1,3 mm pour un pas et une dimension de pixel de 1 mm.

Ce type de technologie est aujourd'hui très performant : seuil de détection quantique, grande plage de linéarité, rapidité.

Tableau 3 – Propriétés des principaux scintillateurs denses (données en gras) mesurées réellement

Nature	ρ (g/cm ³)	μ^{-1} à 4 MeV (cm)	λ (nm)	Indice	photons/MeV	Temps de décroissance à 10 % du signal (ns)
BaF ²	4,89	5,934	220 à 310	1,49	1 800 10 000	0,8 630
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (BGO)	7,13	3,623	480	2,15	700 7 500	60 300
CaWO ₄	6,1	4,417	430	1,92	6 000	6 000
CdWO ₄	7,9	3,425	470	2,3	15 000	15 000
CeF ₃	6,16	4,669	340 300	1,62	4 200 200	27 3
CsI(Na)	4,51	6,159	420	1,84	39 000	630
CsI(Tl)	4,51	6,159	540	1,80	59 000	800
CsI pur	4,51	6,159	315	1,80	2 300	116
Gd ₂ SiO ₅ :Ce	6,71	4,125	440	1,85	10 000	60
NaI:Tl	3,67	7,769	415	1,85	38 000 100 %	230
ZnWO ₄	7,87	3,454	480	2,2	10 000	5 000
CsGd ₂ F ₇ :Ce	6,6	4,267	340		6 080	
Lu ₂ SiO ₅ :Ce	7,4	3,595	420	1,82	30 000	40
LuPO ₄ :Ce	6,53	4,051	350		4 400	23
YAlO ₃ :Ce	5,35	5,703	390	1,94	19 700	31
Bi ₄ Si ₃ O ₁₂	7,13	3,559	480	2,06	1 200	100
CdF ₂	6,64	4,430	540	1,55	200	10
LaF ₃ :Ce	5,94	4,902	290 340	1,7	220 1 890	26,5 185
LaF ₃ :Nd	5,94	4,902	173	1,7	1 800	6
Lu _{1,8} Y _{0,2} SiO ₅ :Ce (LYSO)	7,10	3,770	420	1,81	32 000	40
PbCO ₃	6,6	3,870	475	2,0	800	90
PbSO ₄	6,4	4,068	340	1,85	5 500	55
CuI	5,62	5,084	430	2,35	600	0,5
PbWO ₄	8,2	3,095	460	2,3	490	40
Yb ₂ O ₃	9,17	2,861	350		100	0,5
ZnO:Ga	5,61	5,386	385	2,02	15 000	0,7
Gd ₂ O ₂ S:Pr,Ce	7,34	3,704	510		35 400	3 000
KLu ₂ F ₇	7,5	3,65	165		300	< 2
LiBaF ₃	5,2	5,70	195		1 400	0,8
Y ₂ SiO ₅ :Ce	2,7		415	1,8	45 000	80

2.2.4.4 Amplification gazeuse

Ce type de détecteur utilise en général un convertisseur métallique (plaque ou fil d'un matériau à numéro atomique de Z élevé), de haut pouvoir d'arrêt, plongé dans le gaz d'une chambre à amplification proportionnelle. Les électrons arrachés au convertisseur métallique sont amplifiés par un phénomène d'avalanche dans le gaz. Cette amplification, qui reste « proportionnelle », est également à l'origine d'une émission lumineuse dans l'ultraviolet susceptible d'être lue par une caméra CCD ou tout autre dispositif sensible d'enregistrement de la lumière.

Un démonstrateur de haut pouvoir d'arrêt (supérieur à 30 %) de dimension relativement importante (200 mm × 200 mm) a été réalisé ; il permet d'enregistrer des images en utilisant un accélérateur comme source de rayonnement X (impulsions de 5 μs). Sa dynamique en rayons X va du photon unique à plus de 1 000 photons/mm². Le flou spatial de cette technologie (pleine largeur à mi-hauteur de la réponse impulsionnelle, dite LSF) est de 2 mm pour un détecteur intégrateur à convertisseur à deux dimensions épais structuré en lames (de type store vénitien) et devrait atteindre 500 μm avec un « *micro pattern gaseous detector* ». Cette technologie en pleine évolution devrait permettre la réalisation de scanners tomographiques présentant une bonne résolution spatiale et de très grandes dimensions.

2.3 Extension aux domaines extrêmes : très haute énergie et haute résolution

La géométrie et la nature des objets contrôlés en tomographie pouvant s'avérer hors des possibilités des appareils médicaux ou industriels existants, et les besoins en contrôle devenant de plus en plus exigeants par ailleurs sur le plan des résolutions, de nouveaux tomographes spécifiques ont été développés dans deux domaines : celui de la très haute énergie (supérieure à 450 kV), et celui de la haute résolution.

2.3.1 Tomographie à très haute énergie

La tomographie dite à « très haute énergie » peut être réalisée à partir de deux types de sources :

- des sources gammagraphiques (cobalt 60) (comme sur le site du CEA à Cadarache) ;
- un accélérateur linéaire générateur de photons X.

L'absorption du rayonnement dans la matière n'est plus, dans ce cas, gouvernée principalement par l'effet photoélectrique, mais par d'autres phénomènes comme la diffusion Compton ou la formation de paires électrons-positrons.

En l'occurrence, l'interaction photon X/matière dans la gamme d'énergie utilisée (2 à 15 MeV) se trouve régie par une loi où l'atténuation est directement proportionnelle à la densité. Par ailleurs, les très forts débits de dose employés et la grande dynamique de mesure favorisent le rapport signal/bruit et permettent d'utiliser des filtres en énergie de forte épaisseur en acier qui absorbent les basses énergies et contribuent à diminuer l'effet de durcissement de spectre (§ 2.2.3). À titre d'information, avec un bon étalonnage sur cales d'épaisseurs en gradins, la précision sur la mesure de la densité absolue pour un volume d'analyse de quelques centaines de millimètres cubes est de l'ordre de 5/1 000.

Les installations de ce type, opérationnelles sur le plan industriel, sont toutefois peu nombreuses. Parmi elles, citons celle du centre « computer tomography » de l'EMPA (Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology) à Dübendorf dont l'installation fonctionne avec un Linac 4/6 MeV et une barrette de 63 détecteurs scintillateurs (CdWO₄) en cours d'amélioration.

Une seconde installation (Xylon) est située à Hambourg et fonctionne avec un accélérateur linéaire de 9 MeV.

2.3.2 Tomographie haute et très haute résolution

La résolution obtenue avec des appareils de tomographie conventionnelle est au mieux d'une fraction de millimètre. Pour des investigations plus fines (micrométriques et aujourd'hui nanométriques), il est indispensable d'améliorer la résolution latérale, ce qui ne peut s'obtenir qu'avec des sources de rayonnement X dédiées, des réseaux de détecteurs dont la taille élémentaire est réduite et des pièces de plus petite taille. Comme il a été dit plus avant, la résolution dépendant des dimensions de la source et des détecteurs, on ne peut accéder à des résolutions micrométriques pour une reconstruction bidimensionnelle de la coupe d'un objet par une image 1 024 × 1 024 que si la région imagée de cet objet est de l'ordre du millimètre carré.

L'énergie utilisée pour faire de la microtomographie doit être en général plus faible que celle mise en œuvre en tomographie conventionnelle mais résulte de toute façon, d'un compromis entre la taille de l'objet examiné et l'absorption de celui-ci. Rappelons que pour accroître les contrastes, il est toujours préférable de travailler avec les énergies les plus faibles possible. La gamme d'énergie utilisée est souvent comprise entre 5 keV et 30 keV [17]. Elle peut être obtenue soit avec des sources dites à « microfoyer », soit avec un rayonnement synchrotron.

2.3.2.1 Microtomographie « microfoyer »

Ce type de tomographie peut être réalisé à l'aide d'un générateur de rayons X « microfoyer » du commerce (foyer d'une à deux dizaines de micromètres) ou en utilisant un microscope électronique à balayage (MEB) comme source de rayons X « microfoyer » (figure 12) [20].

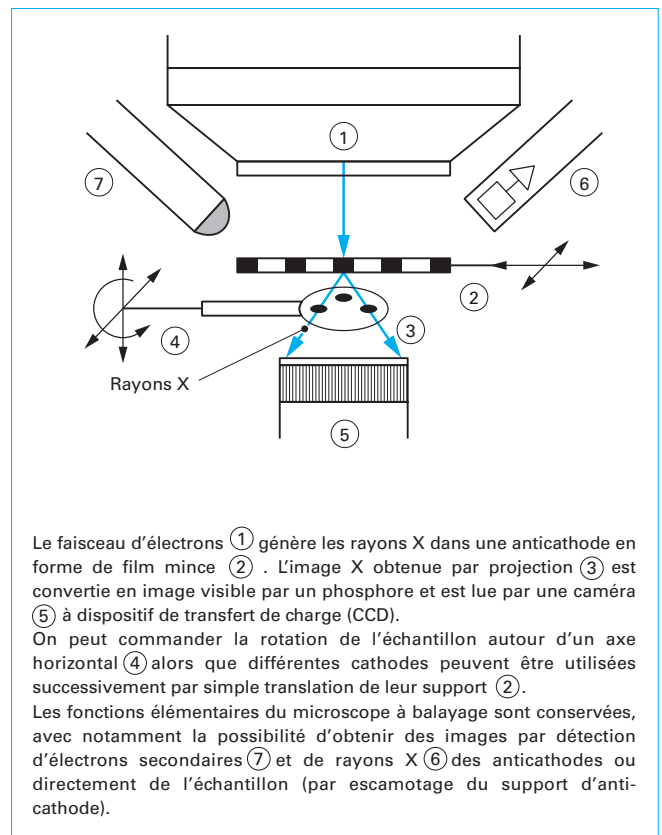


Figure 12 – Principe de la microtomographie « micro foyer » [20]

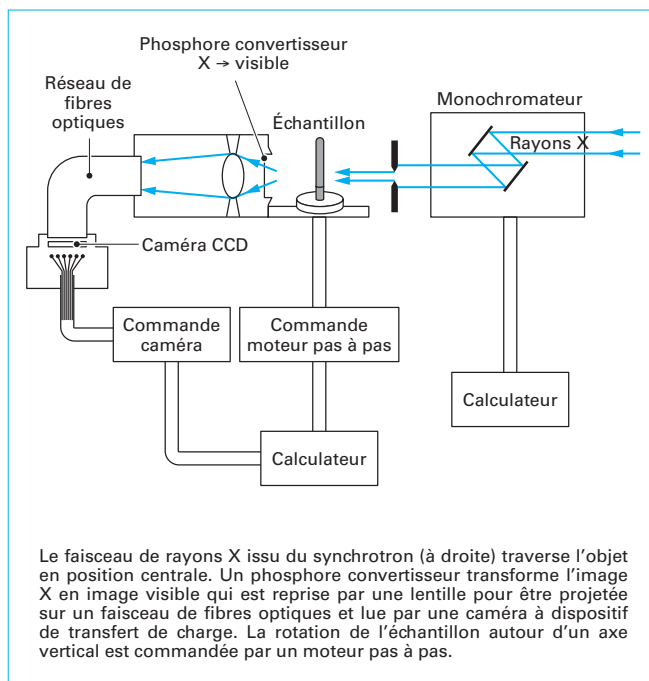


Figure 13 – Principe de la microtomographie par synchrotron [18]

Dans ce dernier cas (MEB), la taille de la source de rayons X est inférieure au micromètre. Dans cette technologie le rayonnement X est généré par le bombardement par le faisceau d'électrons (du microscope à balayage) d'une anticathode en forme de film mince qui donne donc naissance à un faisceau divergent de rayons X (dont la longueur d'onde est caractéristique de la nature de l'anticathode). Le phosphore convertisseur de photons X en photons visibles reprend l'image d'absorption X agrandie par projection sur un écran. Cette image est ensuite numérisée directement par la caméra CCD refroidie par effet Peltier. La résolution latérale de ce dispositif s'apparente à celle d'un synchrotron (§ 2.3.2.2) et est limitée par la taille S de la source.

Avec un générateur « microfoyer » de 200 kV, les résolutions spatiales et densimétriques raisonnablement atteintes sont respectivement de l'ordre de $40\ \mu\text{m}$ et de 0,3 à 0,5 % suivant la nature et la géométrie des pièces. La technologie dans ce cas étant la même que pour les tomographes industriels haute énergie (double balayage translation-rotation), c'est le pas de translation qui définit en fait la résolution spatiale de l'installation [19].

2.3.2.2 Microtomographie par synchrotron

Les synchrotrons, comme celui de l'ESRF (*European Synchrotron Radiation Facility*) implanté à Grenoble, constituent des sources de photons X extrêmement brillantes.

Le principe de la microtomographie par synchrotron est schématisé sur la figure 13 [18].

La radiation incidente est monochromatisée à l'aide d'une lame monocristalline de silicium qui permet d'obtenir, par diffraction sur les familles de plans (111), un faisceau présentant un spectre étroit ($\Delta E = 10^3\ \text{keV}$) centré sur l'énergie utile à l'examen. L'avantage d'un rayonnement monochromatique est de pouvoir s'affranchir des phénomènes de durcissement de faisceau, générateurs des artefacts de reconstruction des images (§ 2.2.3).

Après le monochromateur, le faisceau est dirigé sur l'échantillon qui, monté sur un plateau tournant, peut être orienté selon diverses incidences. L'image intermédiaire résultant de l'absorption des

rayons X par l'échantillon est convertie en image visible par un phosphore (luminophore) convertisseur de photons X en photons visibles. Cette première image est de grandissement unitaire sur l'écran convertisseur, ce qui est dû au fait que la radiation synchrotron délivre un faisceau de rayons X parallèles alors que le faisceau de rayons X divergent introduit un grandissement géométrique M compris entre 10 et 100. L'imageur est une caméra qui délivre une image bidimensionnelle de l'objet. La caméra est constituée d'un écran fluorescent qui, placé derrière l'échantillon, émet un rayonnement lumineux, et d'une caméra CCD délivrant des images numériques de l'écran. Ce dernier est en oxysulfure de gadolinium dopé au terbium et est suffisamment mince pour que l'image lumineuse ait une résolution spatiale de l'ordre de quelques micromètres.

Par application de l'expression de la résolution géométrique (4), on constate que la résolution latérale est limitée à quelques micromètres par la taille individuelle des grains de phosphore.

Par ailleurs, la très forte cohérence spatiale du faisceau synchrotron engendre un phénomène supplémentaire appelé « **contraste de phase** » (§ 2.3.2.3).

En nanotomographie, on peut donner l'exemple d'une ligne spécifique sur le synchrotron « SOLEIL » appelée « Ligne d'imagerie 3D haute résolution » (projet NANOIMAGES X). Bénéficiant d'un faisceau X intense (5 à 25 keV), cohérent et fortement collimaté à 200 m de la source, cette ligne sera entre-autres, dédiée aux études structurales et fonctionnelles dans le domaine de la recherche sur la texture poreuse des catalyseurs et des roches réservoirs de faible perméabilité. Le but de ces études réalisées notamment dans le cadre du projet NANOIMAGESX (IFPEN) est de pouvoir suivre ces matériaux en conditions opératoires pour mieux appréhender les mécanismes physiques des procédés catalytiques ou de récupération d'hydrocarbures [47].

2.3.2.3 Microtomographie à contraste de phase

Le contraste de phase permet d'accentuer par une sensibilité très supérieure le contraste généralement rencontré sur une imagerie de microtomographie classique. On l'utilise surtout dans le cas où la distinction entre matériaux est rendue difficile en raison de leur trop faible différence d'atténuation lors d'une interaction avec un rayonnement X. Il faut toutefois que le faisceau présente une excellente cohésion spatiale (cas du synchrotron de l'ESRF), mais cela peut également se rencontrer sur certaines installations de « microfoyer » comme celle du CEA sur le centre du Ripault. Fonctionnant en réflexion à une tension de 60 kV, cela permet de réaliser des tomographies dont la résolution est inférieure à $4\ \mu\text{m}$ sur des pixels de $2,5\ \mu\text{m}$.

Grâce à cette cohésion spatiale du faisceau, chacune des interfaces présentes dans un échantillon (interface entre deux constituants par exemple ou sauts de densité faibles en bordure de fissuration, de trou ou d'inclusion) se traduit, au niveau de l'écran, par l'apparition d'une figure de diffraction qui souligne, par des franges d'interférence, les discontinuités du milieu. On place une caméra à environ un mètre de l'échantillon pour enregistrer clairement ces figures de diffraction, ce qui correspond au régime de Fresnel. L'acquisition se fait de la même façon qu'en tomographie classique avec des mesures dans différentes positions angulaires d'un échantillon dans le faisceau d'émission. Le faisceau est rendu monochromatique par sélection d'une bande d'énergie très étroite obtenue par diffraction de Bragg sur un cristal de silicium.

Parmi les matériaux les plus fréquents analysés ainsi, on trouve les composites carbone-carbone (figures 14 et 15) [51] et les composés à base d'aluminium et de silicium.

Une première reconstruction est effectuée sans prendre en compte le contraste de phase ; les ligaments y apparaissent creux (artefact).

Sur l'image (c) une optimisation logicielle est effectuée pour corriger l'aberration de la caméra.

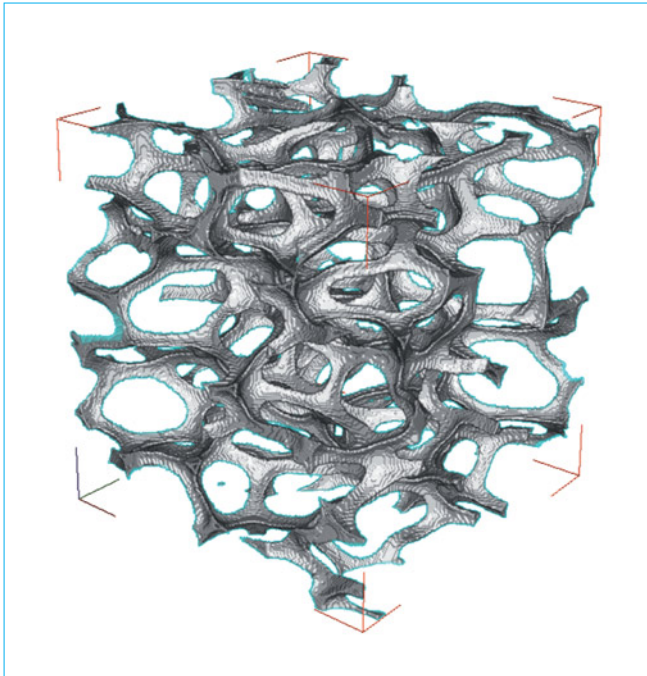


Figure 14 – Tomographie à contraste de phase réalisée à l'ESRF sur un échantillon de mousse de carbone [51]

2.3.2.4 Conclusion et exemples

L'intérêt de la microtomographie est donc de permettre d'accéder sur de petites pièces à des résolutions très fines apportant des renseignements indispensables pour la compréhension des structures et de certains mécanismes, que ce soit dans le domaine médical ou dans le domaine industriel. Elle s'applique sur des échantillons plus épais que ceux analysables en microscopie électronique, sur des échantillons situés dans un environnement gazeux ou liquide et, dans le cas d'objets biologiques, elle permet de les observer *in vivo* sans les artefacts entraînés par leur amincissement et leur dessiccation comme c'est le cas en microscopie électronique.

Exemples : citons les travaux d'une équipe du laboratoire de contrôle non destructif par rayonnements ionisants (CNDRI) de l'Institut national des sciences appliquées (INSA) concernant l'étude de l'endommagement de matériaux composites par microtomographie à l'ESRF ou la caractérisation de la structure osseuse par tomographie avec un « microfoyer » [37] [38].

Plus récemment encore, rappelons que des scientifiques ont réussi à l'ESRF, grâce à la tomographie X, à filmer la transformation du sable en verre [29]. Une image 3D de la réaction en cours a été acquise toutes les 15 s avec une résolution spatiale de 1,6 μm , ce qui a permis d'observer les contacts entre éléments et le passage de matériaux de type granulaire à l'état de verre fondu. Cela ouvre la porte à de nombreuses nouvelles études en fonction de divers paramètres (taille de grains, température etc.) dans le but d'optimiser la fabrication des verres en diminuant la quantité de défauts produits dans cette phase délicate, tout en rendant ces modes de fabrication à la fois plus rapides et plus économes en énergie.

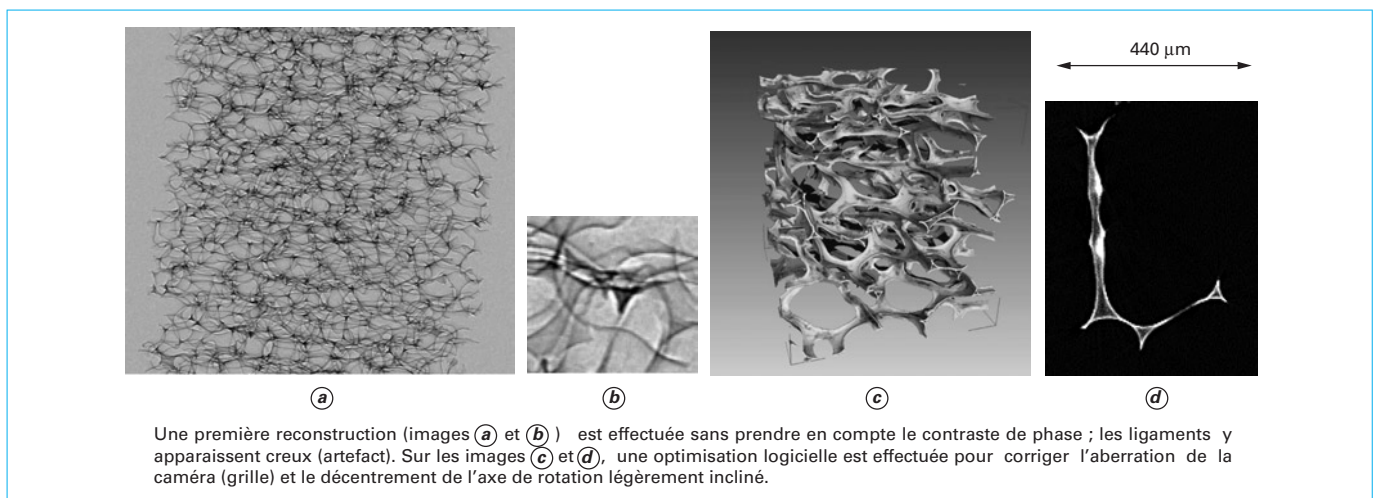
3. Évolution de la tomographie

Les raisons de cette évolution tiennent en quatre points essentiels.

1- À ses débuts, réputée « technique coûteuse », car basée sur de grosses installations commercialisées en petit nombre, la tomographie se développe depuis une dizaine d'années grâce à l'arrivée sur le marché d'installations de toutes tailles, de mise en œuvre plus facile, et livrées souvent aux utilisateurs en « kit » par des ensembles qui associent les éléments indépendants de la chaîne (source, détecteur, supports de mouvements multi-axes et logiciels).

2- L'évolution des logiciels et calculateurs de grande capacité, ainsi que celle des détecteurs (aujourd'hui en conversion directe et surfacique pour la plupart), offre la possibilité d'une acquisition et d'un traitement de grands volumes de données en des temps de plus en plus courts. Cela conduit à l'acquisition des données et à une reconstruction tomographique directement en 3D. Ainsi, la tomographie a gagné, à la fois en temps d'acquisition mais également, en qualité de reconstruction, car l'acquisition en 3D remplace l'empilement des coupes d'autrefois, et supprime les problèmes inhérents de reconstruction des objets aux interfaces. Les temps de calcul prohibitifs d'il y a quelques années ont été réduits, également grâce à l'optimisation d'algorithmes utilisant des cartes graphiques en parallèle.

3- La normalisation récente de la tomographie a permis d'affirmer sa notoriété grâce à des textes indispensables à l'expansion des marchés.



Une première reconstruction (images (a) et (b)) est effectuée sans prendre en compte le contraste de phase ; les ligaments γ apparaissent creux (artefact). Sur les images (c) et (d), une optimisation logicielle est effectuée pour corriger l'aberration de la caméra (grille) et le décentrement de l'axe de rotation légèrement incliné.

Figure 15 – Tomographie à contraste de phase réalisée au CEA Le Ripault sur un échantillon de mousse de carbone à l'aide d'un « microfoyer » en réflexion 60 kV [51]

4- L'utilisation industrielle a connu un changement de cap important, à la fois pour des raisons économiques et pour des raisons techniques. Essentiellement qualitative à ses débuts, elle répond aujourd'hui à des besoins quantitatifs précis qui visent à mieux cerner les défauts détectés dans les pièces tomographiées. En s'appuyant sur une modélisation des comportements des matériaux et une prévision de leur durée de vie, la tomographie s'insère dans une stratégie industrielle qui a évolué du « zéro défaut » au « défaut admissible ». Analyser un défaut, c'est en connaître précisément sa nature et ses dimensions ainsi que sa localisation au sein du matériau, pour en prédire son éventuelle acceptation. De nos jours, la détection d'un défaut ne conduit plus, pour des raisons économiques, au rejet systématique d'une pièce fabriquée s'il est jugé non critique pour le comportement de celle-ci. Ainsi, des défauts de grand volume peuvent-ils être jugés admissibles au sein d'une pièce si leur localisation (par exemple éloignés d'un bord amené à évoluer dans le temps) n'engage pas l'intégrité de celle-ci dans son utilisation, tandis que d'autres, même beaucoup plus réduits, conduiront à son rejet du fait des risques de fragilisation du matériau lors du fonctionnement du dispositif.

4. Applications

4.1 Applications purement industrielles

Quatre grands types de contrôles peuvent être réalisés par tomographie [16] :

- des mesures densimétriques ;
- des recherches de défauts ;
- des mesures dimensionnelles ou géométriques ;
- des mesures de suivi dynamique.

Ces examens se situent aussi bien en production qu'en phase de prototypage et de mise au point de procédés. Ils touchent tous les secteurs industriels (aéronautique, automobile, aérospatiale, fonderie, sidérurgie, plasturgie, métallurgie des poudres ou pétrochimie).

4.1.1 Mesures dimensionnelles ou géométriques

Les mesures dimensionnelles ou géométriques nécessitent une excellente résolution et une épaisseur de coupe en général faible de façon à limiter au maximum les effets de bord et de biais d'épaisseur. Compte tenu de la complexité des structures ou des pièces objets du contrôle, la présence de matériaux divers et quelquefois absorbants peut nécessiter des énergies plus importantes que celles utilisées dans le domaine médical, en particulier pour éviter les artefacts d'images (§ 2.2.3)

Citons les contrôles menés depuis plusieurs années par le centre de tomographie de Tomo Adour qui a travaillé sur la mise au point de reconstructions 3D à partir de coupes réalisées sur son installation haute énergie 450 kV, dans le but de restituer des formes et des cartographies d'inclusions diverses insérées au cœur de matériaux [30]. Tomo Adour a aussi contribué (tomographe 140 kV/357 MaS) à l'important travail réalisé par PSA Peugeot – Citroën concernant les mesures dimensionnelles de porosités et agglomérats de microporosités reconstruites en 3D par tomographie industrielle dans le cadre d'une simulation numérique et calcul d'un **berceau moteur aluminium** (figure 16). La problématique est l'insertion de cette géométrie 3D d'anomalies de santé matière du berceau moteur aluminium, mesuré par tomographie industrielle, dans sa définition nominale pour mener des calculs modaux tenant compte « des réalités matière ».

Les objectifs industriels de cette application sont :

- la validation de la prédictibilité des défauts de fonderie des outils de simulation numérique de fonderie ;
- une comparaison des géométries réelles (déformées) par rapport à une CAO nominale et les résultats de simulations numériques thermomécaniques de la pièce ;

- l'établissement d'un référentiel dimensionnel des tailles de défauts issues de la simulation numérique de fonderie par rapport à la taille réelle du défaut ;

- la prise en compte du défaut de fonderie dans la chaîne de dimensionnement produit.

Sur le plan expérimental, compte tenu des dimensions importantes du berceau, notamment en raison de sa géométrie quatre bras qui excède la capacité dimensionnelle d'imagerie du scanner, cinq acquisitions ont été nécessaires. Pour permettre une reconstruction des données en modèle 3D exploitable, une étape de segmentation a été indispensable pour définir les frontières air-matière ou intermatériaux. Les anomalies de santé matière peuvent ainsi être classées selon leur taille et l'impact qu'elles provoquent sur la densité matière.

L'exportation d'un maillage 3D au format STL de la matière et de ses anomalies est alors réalisée pour chaque acquisition (figures 3c et 3d). Les modèles 3D étant reconstruits (figure 3e), chacun d'entre eux est recalé dans la définition nominale fournie par le constructeur à l'aide des parois du berceau (la notion de matière se résumant à un volume dit fermé en CAO, donc comportant des parois) par la méthode dite de « best-fit ».

Des recalages permettent de placer les anomalies reconstruites au sein de la définition nominale (figure 3f), leur donnant ainsi une position dans l'origine du repère pièce. Ainsi exportés (figure 3g), les modèles 3D peuvent être récupérés par les experts pour y être remaillés dans les règles de l'art afin de pouvoir mener les simulations voulues à leur terme.

Nota : STL pour *Stereo Litography*

Aujourd'hui, la demande en tomographie industrielle dimensionnelle s'oriente vers la mesure du détail dans des ensembles multimatériaux complexes et divers, les échelles allant de quelques dixièmes de micromètre dans une éprouvette millimétrique à plusieurs dixièmes de millimètres dans une pièce de plusieurs dizaines de centimètres. D'autres contrôles tomographiques dimensionnels portent sur des mesures d'épaisseurs de paroi, très importantes pour assurer le bon fonctionnement des pièces (culasses automobiles, répartiteurs d'air..., figure 19).

4.1.2 Mesures de suivi dynamique

L'évolution des matériaux en dynamique est avant tout un phénomène lié au facteur temporel. Observer de tels phénomènes par tomographie nécessite donc des installations capables de réaliser des coupes en des temps très brefs. C'est un domaine privilégié des appareils médicaux dont les temps d'acquisition et de réformation se comptent en secondes voire en fraction de seconde, en raison du grand nombre des détecteurs.

L'institut français du pétrole (IFP), par exemple, utilise cette capacité pour des études en temps réel de phénomènes liés à des écoulements de fluides comme l'étude de la prise en eau d'argiles dans le cadre du stockage des déchets radioactifs (figure 17) ou la récupération de l'huile par injection de gaz dans des milieux poreux pour déterminer, par soustraction d'images, les valeurs de saturation en fluide (figure 18).

4.1.3 Mesures de défauts

Rechercher les défauts dans les pièces est un facteur économique de premier ordre qui permet de prédire le comportement des pièces en fonctionnement. Tous les matériaux quels qu'ils soient ne peuvent y échapper et les types de défauts liés à chaque matériau sont nombreux. Parmi les plus fréquents, signalons de façon non exhaustive :

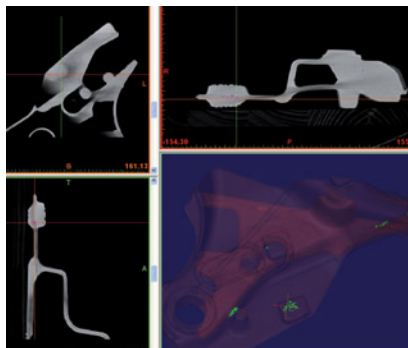
- les fissures ;
- les délaminages interlaminaires et intralaminaires ;
- les défauts de fibres des matériaux composites ;
- les porosités ;
- les inclusions ;



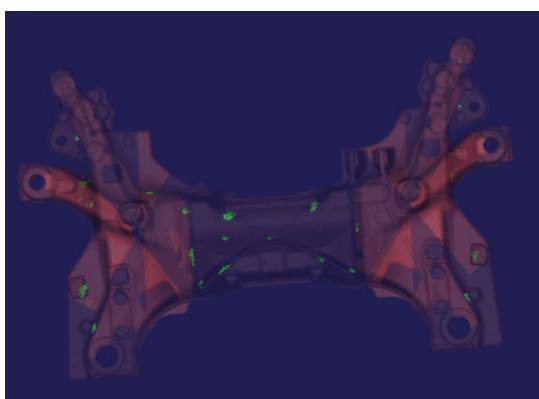
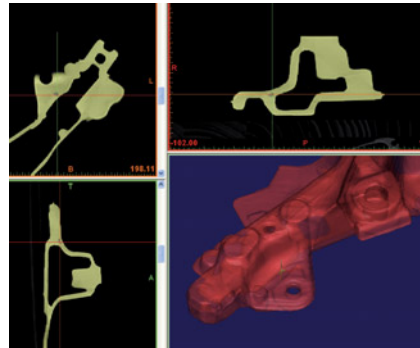
(a) berceau moteur



(b) image issue d'acquisitions tomographiques 140 kV



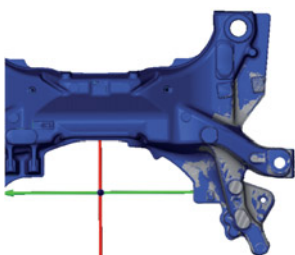
(c) segmentation de la matière et de ses anomalies



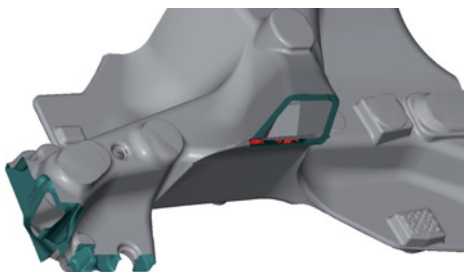
(d) positionnement des modèles 3D des anomalies santé matière dans le repère pièce



(e) porosités calculées par simulation de fonderie



(f) recalage des données reconstruites



(g) anomalies santé matière recalées dans la définition nominale

Figure 16 – Étude dimensionnelle par tomographie X (tomographe industriel 140 kV Tomo Adour) d'un berceau moteur aluminium avec prise en compte des porosités et agglomérats de microporosités (doc. PSA Peugeot Citroën)

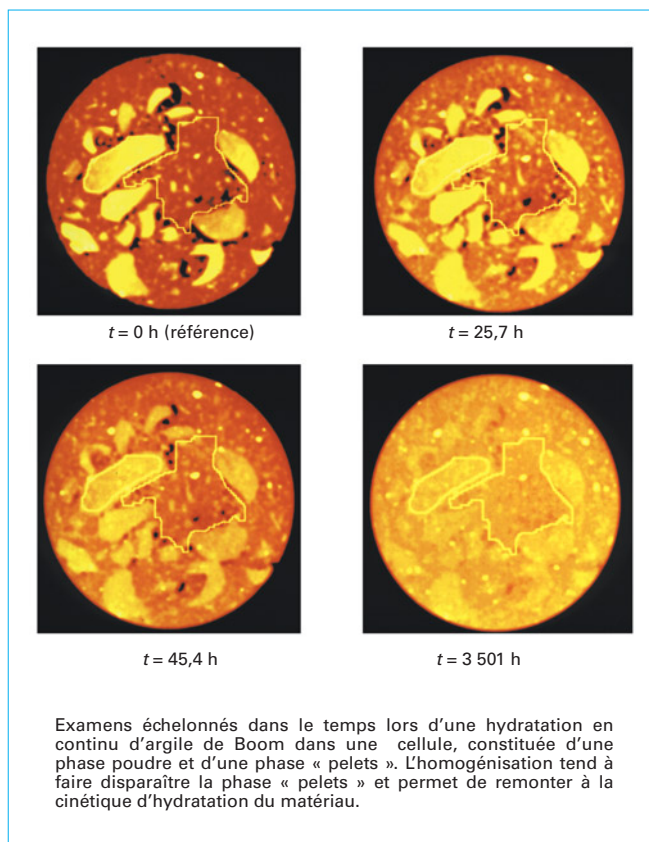


Figure 17 – Visualisation par tomodensimétrie X à l'aide d'un scanner médical de la prise en eau d'argiles de stockage des déchets nucléaires (doc. CEA, collaboration COFREND)

- les défauts d'assemblage (défauts de contact, mauvais positionnement d'une pièce dans une autre ;
- les défauts de collage ;
- les défauts de fusion et de pénétration des cordons de soudure, ou les défauts de forme comme des amincissements ou des bourrelets...);
- les décohésions ;
- les retassures ou soufflures des pièces de fonderie.

Exemple : les figures 19, 20, 21, 22, 23, 25, 24, 26, 27 et 28 illustrent quelques recherches de défauts rencontrés en tomographie et microtomographie.

La tomographie permet en général la détection de ces défauts sans ambiguïté (à l'exception des fissures internes toujours délicates à détecter en raison de leur caractère directionnel, ce qui explique que seules les fissures ayant leur plan en coïncidence avec celui de la coupe tomographique ont une chance d'être détectées, mais il est indispensable pour cela de bien choisir l'outil de contrôle le mieux adapté au matériau.

Les deux paramètres primordiaux influant sur la détection des défauts sont :

- le rapport des absorptions de la singularité recherchée et de la matrice saine dans laquelle elle se trouve englobée. Plus ce rapport est élevé, plus le défaut a de chance d'être détecté ;
- les dimensions du défaut, surtout dans le cas de défauts de taille très inférieure au pixel. Ceux-ci toutefois sont bien détectés, mais exacerbés en dimensions, si la différence d'absorption avec

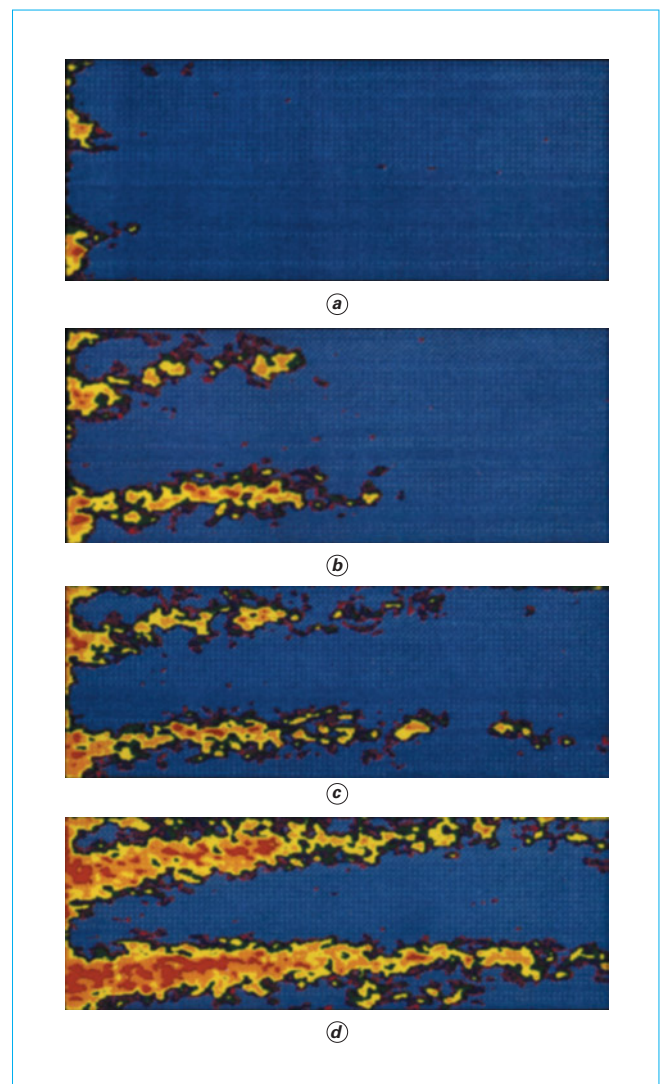


Figure 18 – Visualisation du déplacement d'un gaz dans une carotte saturée d'eau (doc. Institut français du pétrole IFP, collaboration COFREND)

le reste de la matière est significative. Des études sont actuellement entreprises pour évaluer les limites de sensibilité sur des défauts calibrés de pièces étalons utilisées dans des circuits d'intercomparaison à objectif de normalisation.

Quantifier un défaut devient plus ardu quand on connaît les pièges de l'imagerie (artefacts dus aux effets de pointe, durcissement de faisceau falsifiant une image, effets de pénombre dus à des inclusions trop absorbantes...). Toutefois, avec une certaine expérience, les utilisateurs de la tomographie parviennent sans trop de mal, dans de bonnes conditions (avec l'aide d'un traitement d'image approprié), à une évaluation très correcte de ces défauts.

4.1.4 Mesures densimétriques

Dans de nombreux secteurs industriels, la connaissance de la densité des pièces fabriquées est un paramètre important et coûteux intervenant dans la chaîne de fabrication.

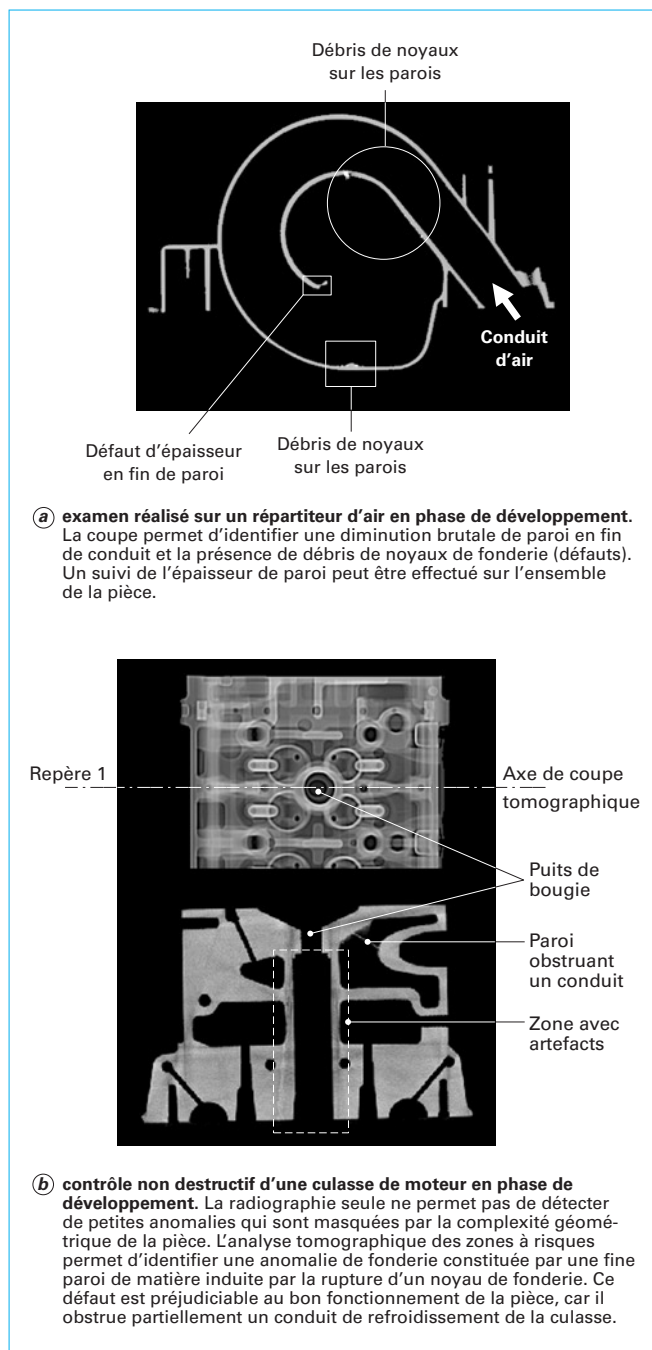


Figure 19 – Tomographie dans l'industrie automobile (doc. Renault SA, collaboration COFREND)

Exemple

La métallurgie des poudres mise en œuvre dans le secteur automobile utilise des aciers frittés pour certaines pièces (roues d'arbre à came par exemple, figure 20), dont on sait que la tenue mécanique est proportionnelle à la densité atteinte dans les zones de forte sollicitation.

Il est donc impératif d'accéder à la mesure directe de la densité locale au sein de la pièce. Seule, la tomographie permet ce type de mesure.

Cette mesure est réalisée à partir de tous les types de coupe mais il est préférable de travailler sur des coupes d'épaisseur maximale pour que la mesure soit plus représentative et la précision plus grande.

En préalable à toute mesure densimétrique, on procède à un étalonnage soigné utilisant des cales d'épaisseur appelées aussi *pénétramètres* de composition voisine de celle des pièces à contrôler. Les différences d'épaisseur des marches des pénétramètres sont traduites en niveaux de gris et normalisées suivant les nombres de l'échelle Hounsfield utilisée dans le domaine médical (§ 2.1.2). La précision obtenue sur une pièce peut varier de $\pm 0,1\%$ à $\pm 1\%$ selon sa forme et le matériau qui la compose. La précision de la mesure des densités dépend beaucoup de la qualité de l'image et en particulier du durcissement de faisceau et du domaine énergétique dans lequel on effectue la mesure. Dans le cas de matériaux multiconstituants et pour les faibles énergies, il est plus difficile, voire impossible, d'accéder directement à une mesure des densités absolues car la loi d'additivité des coefficients d'absorption n'est valable que dans le domaine de diffusion Compton. La mesure tomodensimétrique caractérise plutôt dans ce cas, le rapport μ/ρ (avec μ coefficient d'absorption linéaire et ρ densité).

Pour accéder à une mesure précise de la densité, il est donc nécessaire de travailler à deux énergies différentes et avec des matériaux présentant des courbes d'absorption très différentes entre elles.

L'une des méthodes les mieux adaptées pour réaliser ces mesures, consiste à utiliser des pièces étalons de mêmes nature, forme et dimensions que la pièce à contrôler, ce qui permet d'évaluer l'influence des paramètres inhérents à la géométrie.

Si on connaît précisément la densité moyenne d'une pièce, on peut aussi faire appel à un auto-étalonnage en associant à cette densité le nombre moyen d'Hounsfield calculé à partir de l'ensemble de toutes les coupes réalisées sur la pièce. Par correspondance inverse, on peut ainsi reconstruire la cartographie des densités très précisément à l'intérieur de l'objet.

La tomographie peut aussi permettre dans certains cas d'accéder à l'évaluation de l'hétérogénéité de répartition de matériaux multiconstituants. Toutefois, il est difficile dans ce cas d'effectuer une mesure directe du taux de répartition des matériaux car l'image obtenue est une résultante de l'influence de deux paramètres jouant simultanément sur le niveau Hounsfield : la densité et le coefficient d'absorption des matériaux. Dans le cas d'examen mono-énergétique avec un tomodensimètre médical travaillant à faible tension, il est pratiquement impossible dans la plupart des cas de différencier les influences respectives de ces deux paramètres et le diagnostic doit se limiter à une cartographie d'absorptions relatives. L'emploi d'une méthode dite « bi-énergie » peut permettre de résoudre le problème [40].

4.2 Applications aux sciences du vivant

La tomographie a ouvert depuis la fin des années 1990 un champ d'application plus « exotique » entre le domaine purement médical et le domaine industriel, prenant place dans le cadre des études liées aux sciences du vivant, de l'environnement et du secteur agroalimentaire.

En particulier, il a été montré [33] que cette technique s'applique particulièrement bien à l'examen des sclérobandes du corail, traduisant les rythmes de calcification temporels en fonction des variations climatiques.

C'est également le cas des travaux menés sur le foie gras pour discriminer les trois phases constituant cet aliment (la graisse, l'émulsion et les morceaux) pour lequel un projet de faisabilité technico-économique est mené en vue d'une implantation d'une installation tomographique sur site de production [46].

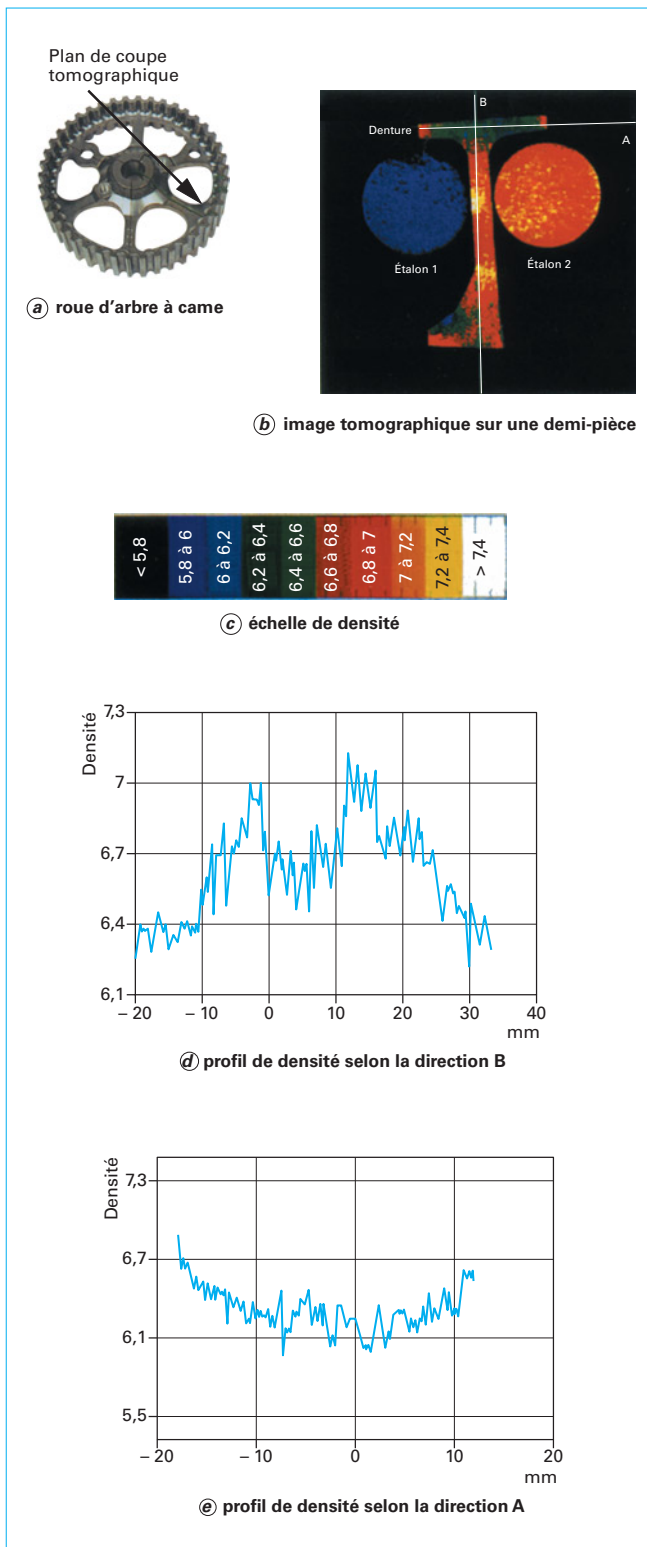


Figure 20 – Examen d'une roue d'arbre à came en acier fritté présentant des zones d'inhomogénéité de densités quantifiées suite à un étalonnage sur disques étalons (doc. PSA, collaboration COFREND)

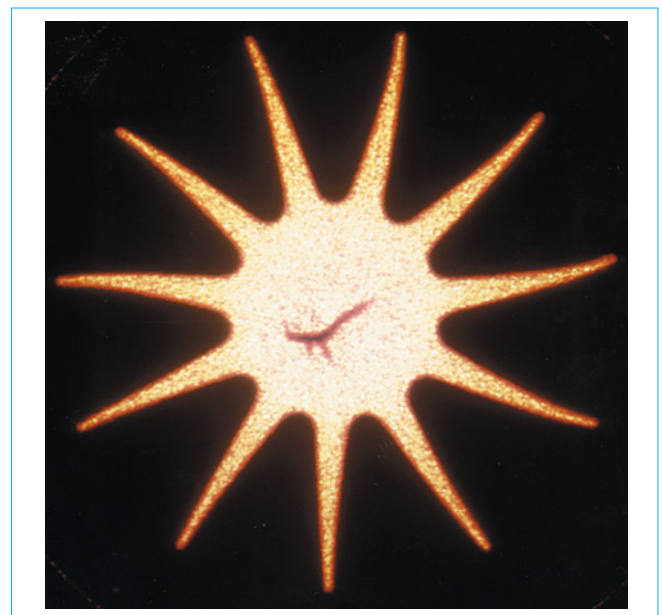


Figure 21 – Mise en évidence d'un important manque de matière dans l'âme d'une roue de turbine à gaz en céramique ($\Phi = 45$ mm) (doc. CER, collaboration COFREND)

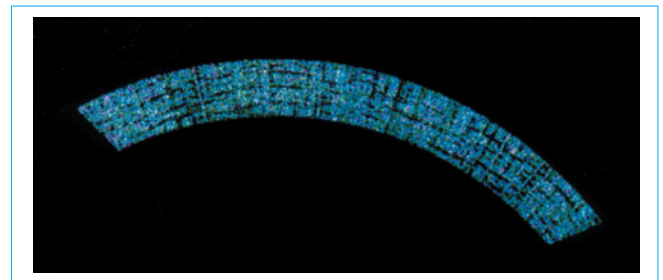


Figure 22 – Étude de la structuration (empilement) d'un composite tridimensionnel (doc. CER, collaboration COFREND)

4.3 Perspectives d'avenir

4.3.1 Reconstructions à données limitées

De par la situation de l'objet au sein d'un assemblage complexe, ou parce qu'il n'est qu'en partie seulement accessible, il n'est pas toujours possible d'acquérir des informations tomographiques offrant suffisamment d'angles de projection en tournant autour de l'objet. De plus, si l'objet présente de très fortes atténuations sur un secteur angulaire, il s'avère difficile, voire totalement impossible, de reconstruire une image correcte. C'est également le cas d'examen où les données sont « polluées » par du bruit.

Dans ce contexte, les techniques classiques de reconstruction tomographique [28] (§ 1.3) ne sont pas efficaces car elles peuvent engendrer de très nombreux artefacts et donner lieu à des solutions qui ne sont pas uniques. Par ailleurs, ces techniques classiques de reconstruction ne prennent pas en compte la totalité des biais introduits par la chaîne de radiographie X, comme :

- le lobe et le spectre en énergie de la source X ;
- l'élargissement dû à la tache focale, les caractéristiques intrinsèques des détecteurs ;
- les rayonnements diffusés...

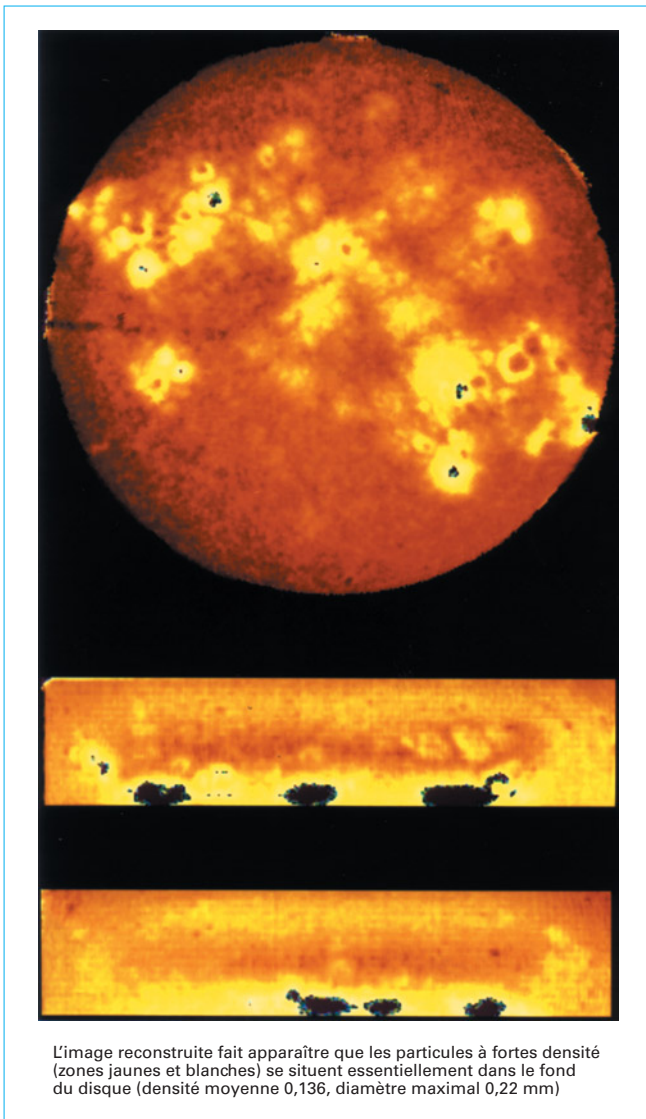


Figure 23 – Hétérogénéité d'un mélange léger biconstituant dans une coupe axiale et deux coupes suivant l'épaisseur d'un disque de 150 mm de diamètre (doc. CEA, collaboration COFREND)

Dans ce cas, il faut utiliser des informations *a priori* sur l'objet [27]. L'approche choisie ici consiste à décrire l'objet avec un petit nombre de paramètres et à chercher numériquement les paramètres qui vérifient :

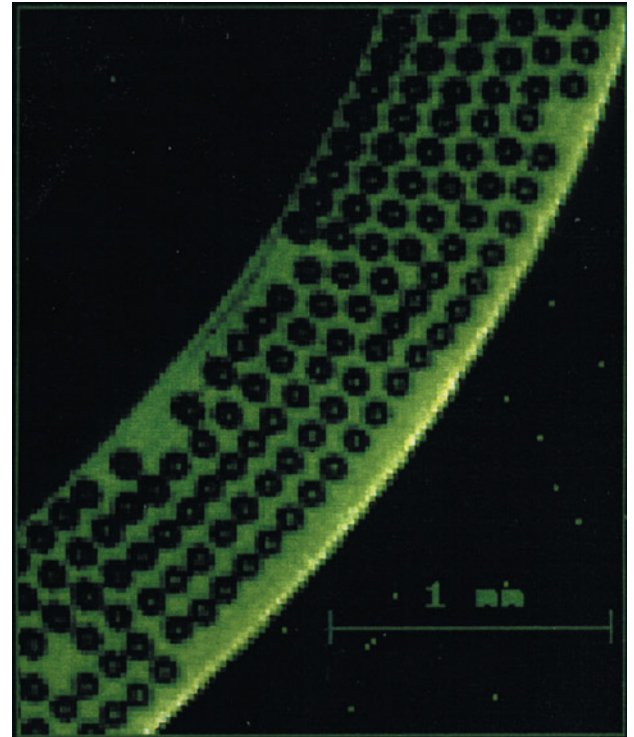
$$E(\omega) = |\Lambda - \text{Proj}_{\omega}|^2 = \sum_{\theta} \sum_{(x,y)} [\Lambda(\theta, x, y) - \text{Proj}_{\omega}(\theta, x, y)]^2$$

$$\bar{\omega} = \arg \min_{\omega \in \mathbb{R}^n} E(\omega)$$

avec E énergie de la source X ,

$$\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^t$$

$\theta \in \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k\}$ ensemble des angles de projection en nombre très limité (k faible variant de 1 à quelques unités),



La coupe est réalisée perpendiculairement à l'axe des fibres et permet de mettre en évidence des absences de fibres

Figure 24 – Microtomographie d'une pièce en composite à matrice métallique (doc. Tomo Adour, collaboration COFREND)

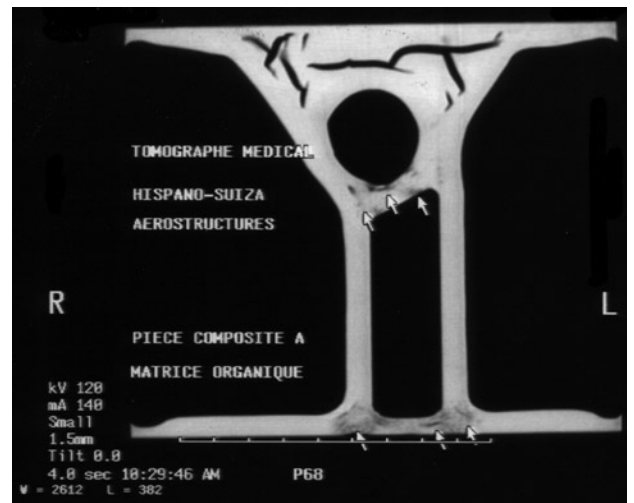


Figure 25 – Défauts d'une pièce composite à matrice organique (doc. Hispano Suiza, collaboration COFREND)

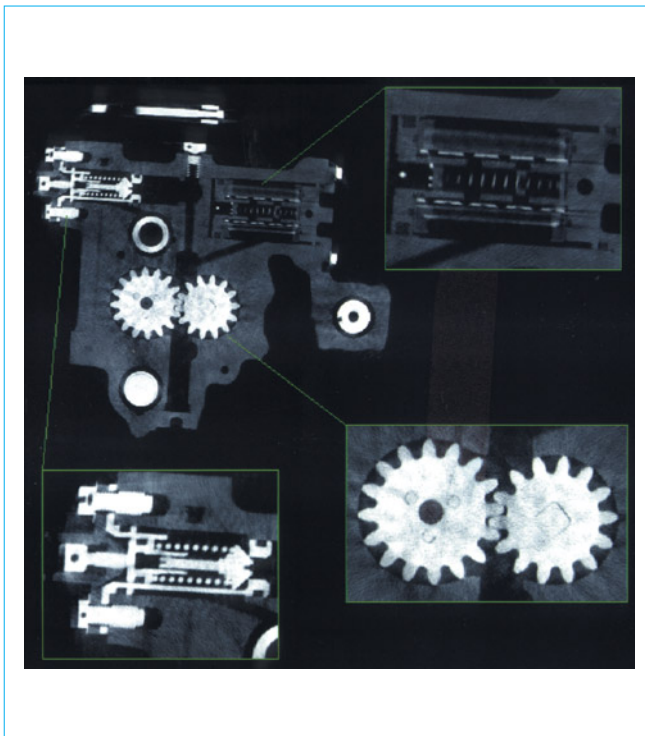


Figure 26 – Caractérisation d'une mécanique de précision. Vérification du positionnement d'engrenages
(doc. Tomo Adour, collaboration COFREND)

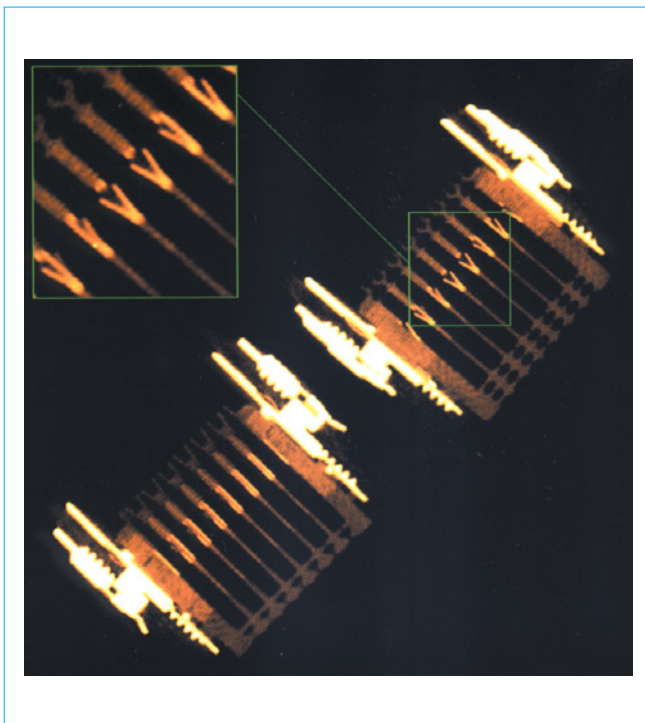
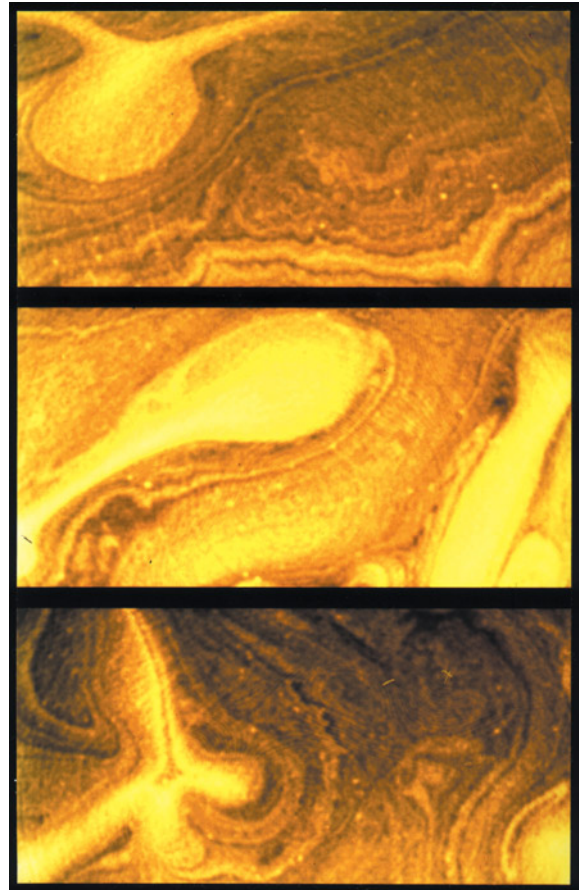


Figure 27 – Défauts de contact dans un connecteur électrique de 70 mm de long (doc. Tomo Adour, collaboration COFREND)



Suivi tomodensimétrique de la fabrication de blocs de mousses en carbone de très faible densité ($0,5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) dans lesquels on peut détecter des zones de turbulence liées aux variations de paramètres mal maîtrisés et la présence de canaux de porosité (points clairs, diamètre de 1 mm maximum).

Figure 28 – Contrôle d'un procédé de fabrication par suivi tomodensimétrique (doc. Carbone Lorraine, collaboration COFREND)

$\Lambda(\theta, x, y)$ valeur de la projection d'angle θ en (x, y) sur le détecteur,

Proj_ω opérateur de projection du modèle paramétré par ω .

À titre d'exemple concret, si l'objet étudié est axisymétrique et que la reconstruction est réalisée avec une seule projection, on peut faire les hypothèses suivantes sur l'objet :

- il est constitué d'un nombre connu de matériaux séparés par des interfaces ;
- les interfaces sont régulières ;
- il n'y a pas de variation brutale de la densité entre les différentes interfaces.

La minimisation de E peut être obtenue pas plusieurs méthodes. Les plus couramment utilisées sont la descente de gradient, le recuit simulé (cf. [AF 205] *Théorie des graphes*) ou ICM (*Iterative conditional mode*).

Ces méthodes ont été utilisées dans [31]. Dans cet exemple, l'objet étudié est axisymétrique. La reconstruction est réalisée avec une seule projection. Les hypothèses faites sur l'objet sont :

- qu'il est constitué d'un nombre connu de matériaux séparés par des interfaces ;
- que les interfaces sont régulières ;
- qu'il n'y a pas de variation brutale entre les différentes interfaces.

Ces propriétés sont traduites mathématiquement à l'aide d'équations paramétriques avec une vingtaine de paramètres.

Cette méthode permet de reconstruire des objets à partir de leurs projections dans le cas où toutes les autres méthodes ont échoué. Par contre, si l'objet ne correspond pas à la description paramétrique choisie, la reconstruction est incorrecte, ce qui est très vite décelé. Le temps de calcul d'une telle reconstruction est très important (il peut atteindre plusieurs jours pour). Toutefois, contrairement aux méthodes habituellement employées, celle-ci présente l'avantage d'introduire dans la projection, les perturbations de la mesure (flou, diffusé...).

4.3.2 Représentation tridimensionnelle (voludensimétrie)

La connaissance précise des pièces fabriquées dans le domaine industriel nécessite d'accéder à une représentation tridimensionnelle des objets. Deux méthodes sont utilisées.

■ La première, dite « **fausse 3D** », consiste en un empilement informatique des coupes jointives réalisées par section d'un objet suivant une direction de coupe dans un plan précis.

Un lissage spatial est alors pratiqué pour filtrer les effets de bords au niveau des interfaces. L'inconvénient majeur de cette méthode réside dans la différence de résolution qui existe entre les directions dans le plan xy et la direction z , la résolution le long de l'axe z de l'empilement étant plus faible que celle située dans les plans de coupe xy .

■ La seconde méthode utilise une **acquisition dite « conique »** similaire à de la radiographie avec une résolution uniforme suivant tous les axes. La source émet un faisceau de forme pyramidale intercepté par des détecteurs bidimensionnels (tomodensitomètres de cinquième génération représentés sur la figure 4e). Les temps d'acquisition, si ils restent le facteur pénalisant de la méthode, demeurent toutefois raisonnables.

L'acquisition avec un faisceau non collimaté donne un plan et non une ligne, par rotation autour de l'objet. La reconstruction du volume s'effectue à l'aide d'algorithmes spécifiques prenant directement en compte des volumes élémentaires (voxels).

Dans ce cas, il est indispensable de bénéficier de moyens informatiques dotés de grandes puissances de calculs et de logiciels dédiés exclusivement à l'analyse tridimensionnelle car le nombre d'informations à traiter pour des matrices cubiques de 400 pixels de côté par exemple, est énorme [33].

4.3.3 Reverse engineering

Cette méthode consiste en une aide à la mise au point des processus de fabrication en utilisant les données de la tomographie comme entrées pour des logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO) ou de fabrication assistée par ordinateur (CFAO). Elle permet ainsi de prévoir à partir de mesures d'écart à l'idéalité, les comportements des pièces réelles fabriquées (souvent des prototypes servant à la mise au point des procédés de fabrication), pour définir des modèles de comportement fiables et représentatifs.

Cette méthode développée dans le domaine aéronautique pour le contrôle des aubes de turbine par exemple, tend à se généraliser également dans le secteur automobile (par exemple chez Ford). Elle prend aussi un essor important en France dans le domaine pétrolier (IFP) [37].

5. Tomographie par autres rayonnements

Bien que pour beaucoup la tomographie, de par son héritage médical, est surtout une technique associée à l'emploi des rayons X comme source de rayonnement, la méthode est avant tout une technique de reconstruction de données acquises par l'interaction rayonnement-matière. Elle peut donc être adaptée à tous les types de rayonnement aussi divers et variés que les neutrons, les rayonnements bêta ou gamma, les ultrasons ou les champs magnétiques. Les principes décrits dans ce recueil pour la tomographie X, étant valables quel que soit le rayonnement, nous décrivons ci-après, en nous bornant aux seuls principes généraux de ces techniques, quelques méthodes de tomographie non concurrentes de la tomographie X, mais complémentaires au vu de leurs domaines d'investigation.

5.1 Gamma tomographie

Son principe est celui de la tomographie par transmission. Elle est souvent dénommée aussi tomographie active [26]. La source est une **source gammagraphique de cobalt 60** collimatée émettant un faisceau plat en éventail. **L'énergie associée, supérieure à 1 MeV**, permet de traverser jusqu'à 600 mm environ de béton et assure l'indépendance du coefficient d'atténuation par rapport au numéro atomique.

Une installation tomographique du CEA Cadarache est dédiée au contrôle de fûts métalliques de 200 L, de 600 mm de diamètre contenant des déchets enrobés dans de la résine polymère, béton ou bitume.

5.2 Tomographie à courants de Foucault

Cette technique repose sur la reconstruction de la structure interne d'un milieu conducteur par le biais de sa conductivité, dans le but de **caractériser et de localiser des défauts de surface** [33] [34].

Réalisé sous diverses fréquences d'excitation, l'effet « tomographique » est obtenu en induisant des **courants de Foucault** dans plusieurs directions privilégiées par rapport à la direction du défaut.

Dans un procédé de reconstruction tomographique d'image, la combinaison des données expérimentales, obtenue en faisant tourner les courants induits, permet d'obtenir des informations sur **l'orientation du défaut**. En particulier, l'une des applications de cette méthode est la **détermination de l'orientation des fissures** plus difficile en tomographie X.

5.3 Résonance magnétique nucléaire RMN

Consulter [P 2 880] *Spectrométrie par résonance magnétique nucléaire*.

Très développée dans le domaine médical, la RMN ou IRM (imagerie à résonance magnétique) utilise pour source de rayonnement un champ magnétique intense émettant des **ondes radio-électriques** excitées par impulsions et détectées sous forme d'anneaux [20].

Le grand avantage de la méthode est de pouvoir séparer des tissus de constitution très voisine non différenciable par des rayons X en raison de leur faible contraste en absorption. C'est le cas par exemple, dans le cerveau, de la matière grise et de la substance blanche.

En milieu industriel toutefois, la technique a peu d'applications en raison du nombre réduit de matériaux constitués de noyaux

susceptibles de résonner (matériaux légers contenant des noyaux de fluor, chlore ou hydrogène).

5.4 Tomographie par neutrons

L'utilisation d'un rayonnement neutronique présente, par rapport aux rayons X, le double avantage de n'offrir qu'une très faible interaction avec le nuage électronique entourant le noyau des atomes (et qui est due seulement aux moments magnétiques des deux types de particules) et, en revanche, une grande interaction avec les noyaux des atomes avec lesquels les chocs sont la cause exclusive du ralentissement des neutrons rapides. Il en résulte que les neutrons, peu sensibles aux échantillons constitués de métaux, sont fortement ralentis par des matériaux légers tels que les milieux aqueux, hydrogénés, les matériaux composites ou les compositions explosives, par exemple.

La résolution spatiale atteinte est respectivement de 0,1 mm et 50 μm avec des neutrons rapides et des neutrons thermiques [24] [25]. La résolution en densité est de 2 %.

5.5 Tomographie Compton

Dans la tomographie classique, l'effet Compton se comporte comme un bruit qui nuit à la qualité des images (§ 2.2.2) et qu'il est indispensable de corriger. Ici, en revanche, les rayonnements diffusés sont utilisés directement comme agents d'imagerie. Une caméra enregistre les photons diffusés suivant leur énergie, et la reconstruction de l'image est réalisée à partir de l'ensemble complet des photons diffusés au premier ordre.

Des travaux récents [52] mettent en avant une nouvelle modalité de tomographie Compton fonctionnant en transmission avec un rayonnement diffusé. On modélise la formation de l'image avec une nouvelle classe de la transformée de Radon sur les arcs de cercle (TRAC). Comme pour la tomographie classique avec son algorithme de rétroprojection filtrée, la méthode de reconstruction de l'image s'effectue ici à partir de l'inversion de la TRAC dans l'espace des composantes harmoniques. Les premiers résultats sont encourageants. L'avantage de cette méthode est de n'utiliser qu'un seul détecteur ponctuel pour reconstruire un espace en deux dimensions.

5.6 Tomographie à ultrasons : échographie

Le principe de l'échographie appliquée couramment en médecine est décrit dans [R 1400] *Contrôle Non Destructif (CND)*.

Cette méthode a été appliquée récemment pour une analyse de la santé des hêtres sur pied, en détectant l'état de dégradation du matériau. Le paramètre, qui permet de reconstruire l'image du tronc, est la vitesse de propagation des ultrasons à travers la section de l'arbre qui se mesure à l'aide de transducteurs spécifiques de fréquence d'émission de 1 MHz. La résolution des images tomographiques varie entre 4 et 5 cm. Bien que faible par rapport à celles obtenues avec des systèmes utilisant les rayons X, cette méthode de détection non destructive et acoustique des défauts des arbres sur pied est à ce jour la meilleure jamais obtenue [53].

5.7 Tomographie à émission de positrons

Cette technique [21] utilisée dans le milieu médical exploite un rayonnement résultant de l'injection d'une substance radioactive dans le corps humain. Cette substance émet des positrons (e^+) qui, en se recombinant avec des électrons (e^-), créent deux photons X (par paire ($e^+ e^-$)) se propageant en sens inverse. La détection de ces deux photons (de 511 keV) par des techniques de coïncidence permet de localiser spatialement le lieu de recombinaison. L'effet tomographique peut être obtenu par reconstruction tridimensionnelle à partir du rayonnement détecté suivant différentes

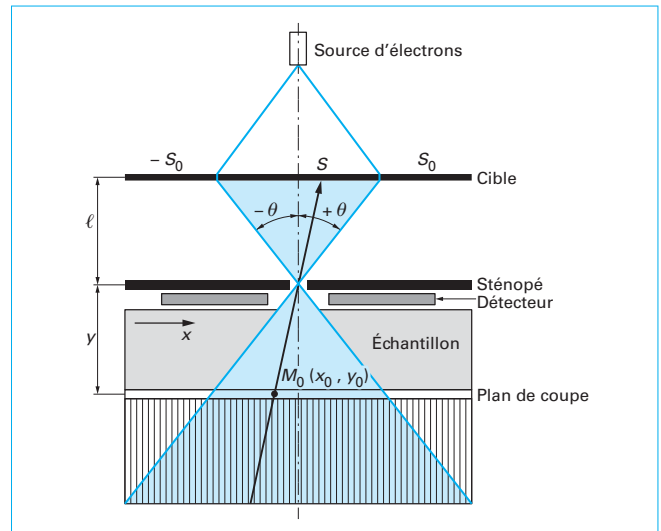


Figure 29 – Principe de la laminographie calculée avec rayonnement diffusé

5.8 Laminographie calculée à rayonnement rétrodiffusé

On crée une source de rayons X mobile en balayant une cible avec un faisceau d'électrons. Le rayonnement émis traverse l'échantillon suivant un angle variable de $-\theta + \theta$ après être passé par une ouverture de faible diamètre (sténopé). Pour chaque valeur de l'angle θ et pour des positions de l'échantillon, on mesure le rayonnement diffusé avec un détecteur de grande surface. On déplace ensuite l'échantillon d'une quantité Δx avant d'effectuer un autre balayage (figure 29).

Connaissant les surfaces S de la cible irradiée (c'est-à-dire la largeur de la source de rayons X) et la distance l séparant la cible de l'échantillon et donc $\tan \theta$, on choisit un point M_0 dans l'échantillon repéré par x_0, y_0 . On peut par une rapide reconstruction faire la somme de toutes les mesures du rayonnement diffusé pour le faisceau X direct passant par ce point lors du balayage. On intègre ainsi N fois la participation de ce point à la somme du rayonnement diffusé le long de l'axe ; tous les points voisins, ne participant qu'une seule fois, ne créent donc qu'un niveau continu constituant le fond.

5.9 Tomographie sismique et tomographie radar

Ce sont deux techniques très voisines et complémentaires [49].

La **tomographie sismique** fonctionne par l'enregistrement d'ondes émises lors de phénomènes comme les tremblements de terre, glissement de continents ou ouverture de failles tant à l'intérieur qu'à la surface du globe terrestre. De très nombreux détecteurs du phénomène sont localisés tout autour du globe. La reconstruction de toutes ces informations permet de globaliser un « scan », par exemple en températures, pour le manteau terrestre. On peut également créer par détonique artificiellement de telles ondes pour analyser les structures des roches. Les mesures des temps d'arrivée de ces ondes, relativement les unes par rapport aux autres, fournissent les variations spatiales des vitesses de propagation des ondes à l'intérieur du globe, et permettent de remonter, *via* des modèles, à des cartographies d'hétérogénéités de la composition chimique ou minéralogique des matériaux le constituant.

La **tomographie radar** est, quant à elle, utilisée pour caractériser par exemple les propriétés physiques de la subsurface du globe

comme la teneur en eau et fonctionne par estimation de la réflectivité radar en 3D sur des acquisitions multipasses. Ces tomographies qui fonctionnent suivant un principe de reconstruction de données en 3D, sont à la limite entre les tomographies à rayonnements et ondes et une famille de tomographies très développées, en particulier outre-manche, appelées tomographies de procédés.

Bien qu'éloignées de la tomographie X, nous ne citerons ces tomographies que pour éclairer le lecteur d'une vision la plus large possible sur ce qui se fait sur la base du concept de la tomographie et nous ne nous contenterons d'aborder ces tomographies que sur un plan purement informatif.

5.10 Tomographies de procédés

En marge des techniques tomographiques basées sur l'utilisation d'un rayonnement de particules diverses et variées, il a été développé tout un domaine de méthodes de contrôle fonctionnant sur les mêmes principes mathématiques que les tomographies classiques, mais traduisant les variations dans la matière des mesures de paramètres physiques simples dont les reconstructions conduisent à des cartographies de phénomènes.

Ces « tomographies de paramètres » [44] appelées aussi « tomographies de procédés », traduisent les « accidents » existant au sein de la matière par des variations de paramètres électriques (mesures d'impédance, diélectriques, de résistivités, de résistances (méthode ERT), ou de capacités [méthode ECT], de paramètres optiques (fluorescence optique) ou de paramètres dynamiques tels la mesure de la vitesse ou de la viscosité de flux par exemple.

Citons par exemple le principe développé par ITS (spécialiste mondial de la tomographie en milieu industriel) (cf. rubrique PESP) qui permet de contrôler par tomographie des structures inaccessibles (tuyaux de centrales thermiques, réacteur ou enceinte close par exemple), à partir d'électrodes placées à leur périphérie, par mesure de tensions électriques et restitution de l'image de l'objet expertisé grâce à une cartographie des résistivités de leurs milieux internes.

Enfin signalons l'application de la tomographie à l'endoscopie par cohérence optique, appelée **Tomographie à Cohérence Optique (TCO)** [50]. Cette méthode d'imagerie, aujourd'hui encore seulement médicale, se caractérise par une haute résolution qui permet de faire des images en profondeur de tissus biologiques dans le but de remplacer les biopsies. Son principe est basé sur l'interféromètre de Michelson, avec miroir de référence. Un balayage de l'échantillon est obtenu en faisant varier la distance de ce miroir en fonction du temps. L'analyse des pics de l'interférogramme donne la position des anomalies recherchées (éléments réfléchissants de l'échantillon). Cette technique pourrait connaître dans l'avenir une application, si ce n'est industrielle, du moins d'investigation de recherche au service des matériaux.

6. Comparaison avec les autres méthodes de CND

Jeune technique de Contrôle Non Destructif en regard des autres principales méthodes utilisées dans l'industrie, la tomographie est issue du domaine médical où elle a révolutionné les aides au diagnostic.

À la différence de la radiographie ou de la gammagraphie auxquelles il est facile de la comparer, la tomographie permet de visualiser, et surtout de localiser en 3D, l'intérieur d'un objet, matériau ou structure. Pouvant donc aisément se substituer à ces

méthodes de CND « globales » qui ne donnent que des projections 2D partielles des singularités recherchées, la tomographie X apporte de façon rapide et très précise, par des données locales internes sur des coupes virtuelles, une information qui manquait jusqu'alors sur la parfaite connaissance de l'intérieur des matériaux et pièces.

7. Conclusion

Face aux ultrasons ou aux courants de Foucault qui sont essentiellement des méthodes de contrôle de surface ou de faible profondeur, la **tomographie X** n'a pas de limite dans la profondeur de ses investigations puisque le nombre de coupes peut être augmenté sans contrainte.

Elle est enfin complémentaire de techniques comme la neutronographie car les domaines des matériaux investigués par ces deux méthodes, s'ils peuvent quelquefois se rejoindre, sont en général très différents.

Outil fiable de plus en plus répandu, bien que le parc de ses installations soit encore très inférieur à celui des autres techniques de CND utilisées, la tomographie X s'applique à des secteurs industriels très variés.

Confrontée à la diversité des matériaux et à la diversité des tâches qui conduisent souvent à mettre en œuvre des équipements lourds, et bien que financièrement de plus en plus accessible en particulier pour les PME et PMI, la tomographie X s'est considérablement développée ces dernières années dans le paysage industriel, grâce à sa grande diversité de fonctionnalités allant de la faible énergie à la très haute énergie (accélérateurs) et de la moyenne à la très fine résolution (tableau 2).

Bénéficiant des avancées technologiques de l'imagerie et de la détection médicale, la tomographie industrielle s'est donc tournée résolument vers l'**analyse tridimensionnelle** en apportant ainsi une part de complémentarité nécessaire aux diagnostics fournis par les autres grandes méthodes de contrôles non destructifs et sa spécificité dans les cas où les techniques conventionnelles s'avèrent inopérantes.

Financièrement très coûteuse de par les dimensions et la rareté de ses installations, la tomographie X dont les capacités techniques ont toujours été pourtant reconnues, a eu des débuts difficiles que seules quelques grandes sociétés (CEA, Aérospatiale, SNECMA...), ont assumés.

Déclinée à d'autres échelles (microtomographie, nanotomographie), grâce aux avancées de la technologie, des supercalculateurs qui peuvent brasser de grandes quantités de données, elle est devenue sur le plan économique accessible à de nouveaux marchés.

Par ailleurs on note que des structures se sont spécialisées en tomographie pour apporter aux PME et petits fabricants, en les commercialisant, leurs moyens, leur expérience et leur savoir-faire dans le domaine des contrôles tomographiques, à l'instar de la Société TomoAdour ou du CETIM qui s'est équipé au travers de son projet Tomopic d'une installation prestataire permettant d'ausculter des pièces jusqu'à 1 m de haut, 500 mm de diamètre et 100 kg.

De nouveaux fabricants ont rejoint les fabricants initiaux d'installations ; une pensée tomographique s'est organisée et elle s'est ouverte à une nécessaire normalisation [Doc. P 950].

C'est une technique qui ne peut encore qu'évoluer mais, plus qu'un concept, elle est une véritable méthode de CND qui s'est déjà largement ouverte les portes des grands marchés industriels de demain pour devenir compétitive là où on ne l'attendait pas.

Tomographie à rayons X

par **Christian THIERY**

Ingénieur traitement d'images et CND
Président du groupe « tomographie industrielle » (COFREND)
Expert tomographie (groupe CEN)
CEA

Sources bibliographiques

- [1] GUINIER (A.). – *Les rayons X*. PUF, Collection « que sais-je ? » (1984).
- [2] TREMOLIERES (J.). – *La tomodynamisme*. Électronique applications, n° 11, p. 36 (1978).
- [3] DELORME (G.) et TESSIER (J.P.). – *Manuel d'électroradiologie*. Tome 1 : Bases physiques et biologiques, Masson (1978), Tome 4 : Tomodynamisme (dont les 20 premières consacrées aux principes, le reste étant médical), Masson (1990).
- [4] JOFFRE (F.) et GIRON (J.). – *Guide du manipulateur en imagerie médicale*. Tome 1, Bases techniques et physiques, Éd. Axone (1989).
- [5] MORGAN (C.L.). – *Basic principles of computed tomography*. University Park Press Baltimore, MD, USA (1983).
- [6] HERMANN (G.T.). – *Image reconstruction from projections*. Topic in applied physics, Springer Press NY, 32 (1979).
- [7] BOSSI (R.H.) et KNUTSON (B.W.). – *The advanced development of X-ray computed tomography applications*. Final report, Boeing Defense et Space, WL-TR-93-4016, juin 1993.
- [8] GRANGEAT (P.). – *Reconstruction d'une image 3D à partir de radiographies X*. Actes du congrès RX GAMS 91 (17-19 sept. 1991 – Blois), Éd. GAMS, p. 219-224 (1991).
- [9] VEIGELE (W.M.J.) et al. – *X-ray cross section compilation from 0,1 keV et 1 MeV*. Kaman Sciences corp., Colorado, USA, report n° 24, p. 11 (1971).
- [10] KRAMERS (H.A.). – *On the theory of X-ray spectrum*. Phil. mag. (GB), 46, p. 836-471 (1923).
- [11] GREEN (M.) et COSSLETT (V.E.). – *Measurements of K, L and M shell X-ray production efficiencies*. Brit. J. Appl. Phys. (GB) (J. Phys. D.) Ser., 2(1), p. 425-436 (1968).
- [12] PAUTON (M.) et MORISSEAU (P.). – *La tomographie industrielle à rayons X*. La technique moderne, p. 9-15, mai-juin 1989.
- [13] ELLINGSON (W.A.) et VANNIER (M.W.). – *Applications of dual energy X-ray computer tomography to structural ceramics*. Adv. in X-ray analysis, USA, 32, p. 629-640 (1989).
- [14] RADON (J.). – *Über die Bestimmung von Funktionen durch die ihre grawlwerte langs gewisser Manigfatigkeiten*. Berichte der Sachsischen Akademie der Wissenschaften, Leipzig, Math.-Phys. K1, 69, p. 262-267 (1917).
- [15] RUSS (J.C.). – *X-ray imaging of surface and internal structure*. Adv. in X-ray analysis, USA, 31, p. 25-34 (1988).
- [16] HUNT (P.K.), ENGLER (P.) et FRIEDMAN (W.D.). – *Industrial applications of X-ray computed tomography*. Adv. in X-ray analysis, USA, 31, p. 99-105 (1988).
- [17] MAISL (M.), REITER (H.) et HOLLER (P.). – *Micro-radiography and tomography for high resolution NDT of advanced materials and microstructural components*. Journal of Engineering Materials and Technology, 12, p. 223-226, avr. 1990.
- [18] KINNEY (J.H.), JOHNSON (Q.C.), SARGYAN (R.A.), NICHOLS (M.C.), BONSE (U.), NUSSHARDT (R.) et PAHL (R.). – *Energy modulated X-ray microtomography*. Rev. Scient. Instr., 59, p. 196-197, janv. 1988.
- [19] CAZAUX (J.), THOMAS (X.) et MOUZE (D.). – *Microscopie et microtomographie X de laboratoire*. J. Microsc. Spectrosc. Electron. (F), 14, p. 263-276 (1989).
- [20] BERNARD (A.M.), DE CERTAINES (J.D.) et LEJEUNE (J.J.). – *Résonance magnétique nucléaire, applications biomédicales*. Collection « Abrégée de médecine », Masson (1987).
- [21] TER-POGOSSIAN (M.), RAICHLE (M.) et SOBEL (B.). – *La tomographie par émission de positrons*. Pour la Science, n° 38, p. 32-35, déc. 1980.
- [22] BRESSON (Y.). – *Médecine nucléaire et radiobiologie*. Hermann, collection « Méthodes », p. 379 (1990).
- [23] FELDCAMP (L.A.), DAVIS (L.C.) et KRESS (J.W.). – *Practical cone beam algorithm*. J. Opt. Soc. Am. A, vol. 1, n° 6, p. 612-619, juin 1984.
- [24] PFISTER (G.), SCHATZ (A.K.), GOBEL (J.) et KOFLER (R.). – *Computerized tomography with fast and thermal neutron*. State of the art and future perspective. International Symposium on computerized Tomography for Industrial Applications, DgZfp Berlin 8-10/06/1994, p. 40 (1994).
- [25] BUCHERL (T.), STEICHELE (E.) et MUNCHEN (T.U.). – *Computerized tomography with thermal neutron*. DgZfp Berlin 8-10/06/1994, p. 377 (1994).
- [26] THIERRY (R.), PETTIER (J.L.) et ECK (D.). – *Edge-preserving regularization in emission tomography with transmission CT boundary information: characterization of waste drums*. Nuclear Science Symposium Conference Record, IEEE, vol. 3, p. 1738-1742 (2003).
- [27] DJAFARI (A.M.). – *Image reconstruction of a compact object from a few number of projections*. IASTED SIP 96, Floride, nov. 1996.
- [28] HERMAN (G.T.). – *Image reconstruction from projections, the fundamentals of computerized tomography*. Série « Computer Science and Applied Mathematics », Academic Press, ISBN 0-12-342050-4 (1980).
- [29] GOUILLART (E.), TOPLIS (M.J.), GRYNBERG (J.) et CHOPINET (M.H.). – *In-situ synchrotron microtomography reveals multiple reaction pathways during soda-lime glass synthesis*. The journal of the American Ceramic Society, 29 avr. 2013.
- [30] LAGRANGE (J.M.), THIERY (C.) (CEA/DAM, DIF), VOLTZ (CEA/DAM, DFTN), GENOT (S.) et ECHEVARRIA (F.) (Société TOMOADOUD, Pau). – *Éléments de caractérisation de la fracturation de matériaux par explosif: analyse par tomographie*. Communication aux journées COFREND de Dunkerque, mai 2011.
- [31] LAGRANGE (J.M.). – *Reconstruction tomographique à partir d'un petit nombre de vues*. PhD thesis, ENS, Cachan (1998).
- [32] SENASLI (M.), GARNERO (L.), HERMENT (A.) et PELLOT (C.). – *Stochastic active contour model for 3D reconstruction from two X-ray projections*. International meeting on fully 3D image reconstruction in radiology and nuclear medicine, Grenoble, juil. 1995.
- [33] MADAOUÏ (M.), PREMEL (D.) et PLACKO (D.). – *Conception et modélisation d'un capteur à courants induits tournant pour la reconstruction tomographique d'images par courants de Foucault*. NUMELEC, p. 166-167, mars 1997.
- [34] MADAOUÏ (M.), PREMEL (D.) et PLACKO (D.). – *Description et modélisation d'un dispositif expérimental à courants induits tournants pour la tomographie 3D à courants de Foucault*. Congrès COFREND, Tome 1, Nantes, p. 241-245, sept. 1997.
- [35] BESSAT (F.) et al. – *Tomodynamisme et mesure de d180 sur Porites lutea à Mururoa: une approche nouvelle pour appréhender l'influence de la radiation solaire sur la croissance corallienne*. CR Acad. Sci. série III, 320, p. 659-665 (1997).
- [36] MENEGAZZI (P.), PERROCHEAU (R.), SEGUIN (O.), HENRIOT (S.), DUPONT (A.) et MARTINEAU (N.). – *X-ray CT-Scan digitizing for the inspection and computational analysis of complex engine parts*. International Congress and Exposition Detroit, SAE 980307, Michigan, fév. 1998.
- [37] KAFTANDJIAN (V.), PEIX (G.), BABOT (D.) et PEYRIN (F.). – *High resolution X-ray computed tomography using a solid state linear detector*. Journal of X-ray science and technology, 6, p. 94-106 (1996).
- [38] MITTON (D.), CENDRE (E.), ROUX (J.P.), ARLOT (M.E.), PEIX (G.), RUMELHART (C.), BABOT (D.) et MEUNIER (P.J.). – *Mechanical*

- properties of ewe vertebral cancellous bone compared to histomorphometry and high resolution computed tomography parameters.* Bone, vol. 22, n° 6 (1998).
- [39] THIERY (C.) et FRANCO (P.). – *Détection des défauts.* « Dossier tomographie », Revue Contrôle Industriel, n° 237, oct. 1998.
- [40] ROBERT-COUTANT (C.). – *Radiologie double énergie : techniques et applications.* CR JRI 2000, Grenoble, 1 fév. 2000.
- [41] GERSTENMAYER (J.L.), BONIN (O.), GERBE (V.), GLASSER (F.) et PEYRET (O.). – *New CdTe quantum sensor, with improved spatial resolution, for fast X-ray and γ -ray imaging.* Mat. Res. Soc. Symposium Proceedings, vol. 487 (1998).
- [42] GERSTENMAYER (J.L.). – *High DQE performance X- and γ -ray fast imagers emergent concepts.* Methods in Physics Research A, 422, p. 649-655 (1999).
- [43] CAVAILLER (C.), GERSTENMAYER (J.L.), DE MASCUREAU (J.) et VIBERT (P.). CEA. – *Installation AIRIX (83).* Revue CHOCS, n° 23, juin 2000.
- [44] Proceedings of « 1st World Congress on industrial process tomography » (UMIST), Buxton, Derbyshire (GB), 14-18 avr. 1999.
- [45] BROOKS (R.A.) et DICHIRO (G.). – *Statistical limitations in X-ray reconstructive tomography.* Medical physics, vol. 3-4, p. 237-240 (1976).
- [46] CORNELOUP (G.), GUEUDRE (C.) et LILLAMAND (I.). – *Contrôle non destructif du foie gras.* 7^e journées de la recherche sur les palmipèdes à foie gras-Arcachon, 18-19 sept. 2006.
- [47] IFPEN. – *Investissements d'avenir-Équipement d'excellence – projet NANOIMAGESX.* Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, mai 2013.
- [48] WILS. (P.). – *Tomographie par rayons X – correction des artefacts liés à la chaîne d'acquisition.* Thèse INSA 2011ISAL0120, Lyon, 17 nov. 2011.
- [49] CORIN (L.), COUCHARD (I.) et DETHY. (F.). – *Radar tomography applied to foundation in a karstic environment.* Geological Society Engineering Geology, p. 167-173 (1997).
- [50] GASCON (A.). – *La tomographie par cohérence optique pour l'endoscopie.* École Polytechnique de Montréal, Dpt. Génie Physique (2010).
- [51] THIERY (C.), BONIN (T.). – *Présentation de la tomographie X (conférence invitée).* Colloque « RX et Matière », Tours, 30 nov. 2011.
- [52] RIGAUD (G.) et NGUYEN (M.K.). – *Une nouvelle modalité en tomographie.* Compton (ETIS).
- [53] MARTINIS (R.), SOCCO (L.V.), SAMBUELLI (L.), NICOLETTO (G.), SCHMIDT (O.) et BUCUR (V.). – *Tomographie ultrasonore pour les arbres sur pied.* Anais of forest Science, vol. 61, n° 2, p. 157-162 (2004).

À lire également dans nos bases

- MOUNAIX (P.), et RECUR (B.). – *Tomographie à l'aide de rayons térahertz.* [RE 172] (2012).
- DI MICHEL (M.), CLOETINS (P.), SALVO (L.) et MAIRE (E.). – *Tomographie à rayons X appliquée à l'étude des matériaux.* [IN 20] (2004).

Outils logiciels

Société DIGISENS – Logiciels de tomographie 3D
<http://www.digisens3d.com>

Événements

Industrial Computerized Tomography – ASNT July 25-27, 1989 Seattle WA (USA)

Industrial Symposium on computerized Tomography for Industrial Applications – DGZFP-BAM June 08-10, 1994 Berlin (Allemagne)

Digital Industrial Radiology and Computed Tomography DIR 2007 – INSA Lyon

Normes et standards

ISO 15708-2 2002 Essais non destructifs – Moyens utilisant les rayonnements-tomographie informatisée – Partie 2 : pratique d'examen

NF EN1016 Essais non destructifs – Méthodes par rayonnements. Tomographie informatisée – Partie 1 : terminologie – Partie 2 : principes, équipements et échantillons – Partie 3 : fonctionnement et interprétation – Partie 4 : qualification

Brevets

Procédé de reconstruction d'image tomographique – EP 1356433 A1 29/10/2003

Appareil de tomographie assisté d'un ordinateur – EP 0037151 A2 07/10/1981

Appareil et procédé tomographique en cohérence optique et détection combinée EP 18338212 A1 03/10/2007

Annuaire

Constructeurs – Fournisseurs – Distributeurs (liste non exhaustive)

- ZEISS** – Carl Zeiss industrielle Messtechnik GmbH (Allemagne)
- LOT** – Quantum Design GmbH (Allemagne) – Modèles Micro XCT 200 et 400
- YXLON International GmbH** (Allemagne) – Tomographe 3D
- IC ESCOFFIER** – Cabines de tomographie compactes en 225 ou 450 kV avec barrettes à diodes ou écran plat au silicium amorphe
- SIEMENS Health care global** – Tomographe TEP/CT Biograph MC 16 HR
- PHOENIX X RAY SYSTEMS** – Tomographe 3D v/tome/xs à ultra haute résolution
- GENERAL ELECTRIC (GE)** – Modèle medical OPTIMA CT 540 CE
- HITACHI** – Scanner X multicoupes pour examen corps entier

MEDTRONIC – Scanner X mobile

TOSHIBA – Scanner X hélicoïdal multicoupes pour corps entier

AGFA Health care – Tomographe à cohérence optique

Organismes – Fédérations – Associations (liste non exhaustive)

- COFREND** – Groupe de travail « Tomographie Industrielle »
<http://www.cofrend.com>
- CETIM** – **Projet TOMOPIC** – prestataire de tomographie RX pour pièces de fonderie
<http://www.cetim.fr>
- TOMO ADOUR** – 1^{er} prestataire Européen de contrôle 2D et 3D par tomographie industrielle RX
<http://www.tomoadour.com>

Les Techniques de l'Ingénieur : **UNE APPROCHE GLOBALE DE VOS BESOINS**



Plus de 8000 articles scientifiques et techniques en français et les services associés pour aller plus loin dans vos recherches documentaires et bibliographiques.

Techniques de l'ingénieur est la base de référence des bureaux d'études et de la conception, de la R&D, de la recherche et de l'innovation industrielle.

Les experts des Techniques de l'Ingénieur partagent leurs savoir-faire techniques et organisationnels.

Montez en compétence grâce aux journées techniques et formations HSE ou privilégiez un parcours « sur-mesure » développé par nos conseillers formation et réalisé à vos dates et dans votre établissement.

Tout l'ADN des Techniques de l'Ingénieur à votre disposition.

Nos experts et spécialistes scientifiques, praticiens expérimentés, vous accompagnent tout au long de vos projets pour vous conseiller : diagnostics, recommandations techniques et montée en capacité de votre R&D jusqu'à l'innovation.

RESSOURCES DOCUMENTAIRES

L'expertise technique & scientifique de référence

Intégrer la communauté des utilisateurs des Techniques de l'ingénieur, c'est accéder à plus de 8000 articles : les fondamentaux, mais aussi des fiches pratiques et les archives. Validé par nos comités scientifiques, ce corpus scientifique et technique, riche de 400 bases documentaires, est la plus importante ressource de ce type en français. En permanence mis à jour et avec plus de 300 000 utilisateurs, c'est l'outil des entreprises industrielles innovantes, plébiscité par les bureaux d'études et les services de conception et de R&D, les directions techniques, les formations d'ingénieur.



Intégrer la communauté des utilisateurs des Techniques de l'ingénieur, c'est également un moyen d'accéder à l'information ou la documentation la plus pertinente, pour aller chercher la chercher là où sont vos clients, fournisseurs ou partenaires, avec, dans votre abonnement, des services⁽¹⁾ tels que :

Le dictionnaire technique multilingue

Plus de 45 000 termes scientifiques et techniques. Tous les termes sont disponibles en 4 langues : français, anglais, espagnol, allemand. Pour 10 000 d'entre eux, retrouvez des illustrations, avec légendes, elles aussi toujours traduites en 4 langues.

L'annuaire des laboratoires de recherche

Pour chacune des bases documentaires, l'équipe éditoriale de Techniques de l'ingénieur a sélectionné pour vous les spécialistes, laboratoires, publications et projets les plus pertinents.

Le Service question-réponse

Posez, par mail, des questions techniques et scientifiques aux spécialistes des domaines couverts par ces bases.

Les Articles découverte

Consultez gratuitement un ou plusieurs articles de votre choix, issus de bases documentaires des Techniques de l'ingénieur auxquelles vous n'êtes pas abonné (offre limitée).

Et aussi

- L'accès à l'espace Veille et Actualité.
- L'accès à nos Archives.

A noter que votre statut d'abonné vous permet d'accéder à des prestations complémentaires, sur devis : **l'impression à la demande pour obtenir un ou plusieurs ouvrages « papier »** supplémentaires ou encore **la traduction d'un article**.

Mobilité

Nos contenus sont également disponibles sur Ipad.

(1) Le détail des services est dépendant du périmètre de votre abonnement.

FORMATION

Les experts des Techniques de l'Ingénieur partagent leurs savoir-faire techniques et organisationnels.

Montez en compétence grâce aux journées techniques et formations HSE ou privilégiez un parcours « sur-mesure » développé par nos conseillers formation et réalisé à vos dates et dans votre établissement.



Nos domaines d'intervention

- Journées Techniques : toutes les évolutions scientifiques et techniques : critères d'innovation, risques associés et comparaison des meilleures pratiques.
- Conception - Innovation : les clés de l'innovation, les outils de conception et de simulation pour accélérer et le développement
- Efficacité Professionnelle : les fondamentaux du management de la communication et du business plan.
- Risque Chimique : REACH, FDS étendues, SGH/CLP, ATEX.
- Santé - Sécurité : prévenir les risques et mobiliser les équipes.
- Environnement : couvrir les exigences réglementaires et choisir les solutions techniques les plus adaptées.
- Construction : pathologies, référentiels et solutions techniques pour améliorer l'efficacité énergétique et environnementale.

Formation sur-mesure & coaching

Pour accompagner votre politique de développement des compétences, nous mettons en place des actions de formation personnalisées et de coaching individuel ou collectif.

3 avantages d'une formation effectuée dans votre entreprise :

- **Sur-mesure** : un programme adapté à vos besoins et aux spécificités de votre activité
- **Flexibilité** : une mission de formation ou de conseil aux dates et lieu de votre choix
- **Coûts maîtrisés** : un budget optimisé aux spécificités de chaque entreprise pour déployer la mission au sein des équipes, en toute confidentialité.

CONSEIL

Tout l'ADN des Techniques de l'Ingénieur à votre disposition.

Nos experts et spécialistes scientifiques, praticiens expérimentés, vous accompagnent tout au long de vos projets pour vous conseiller : diagnostics, recommandations techniques et montée en capacité de votre R&D jusqu'à l'innovation.



- Vous cherchez à réaliser une étude scientifique, technique ou réglementaire ?
- Vous souhaitez bénéficier de conseils stratégiques, d'une aide à la décision ou de soutien opérationnel ?
- Vous voulez être accompagné dans vos démarches d'optimisation ou dans vos projets d'innovation ?
- Vous souhaitez compléter votre capacité R&D interne ?

Techniques de l'ingénieur accompagne votre projet de l'étude à l'industrialisation

3 bonnes raisons de nous retenir :

- un réseau d'experts reconnus
- un accompagnement technique et scientifique de référence
- un benchmarking permanent des meilleures pratiques industrielles

Nos Prestations

Audit et diagnostic : audit de process et de produit, diagnostic d'équipement, tests et banc d'essais...

Accompagnement technique : une feuille de route technique créatrice de valeur.

Mise en conformité : réglementaire, sécurité pour les travailleurs, certification normative, respect de la charte groupe...

Pilotage de projet complexe : bénéficiez de la méthodologie de conduite de projet de techniques de l'ingénieur, de la planification technique au management des hommes et des femmes qui composent l'équipe projet.

Recommandations technologiques

Notre méthode en 6 étapes

Toutes les missions sur-mesure que nous mettons en place sont co-construites avec vous.

1. **Recueillir** et analyser votre besoin
2. **Élaborer** votre mission sur-mesure : clarifier les objectifs, méthodes et indicateurs de performance
3. **Préparer** la mission et rencontrer votre équipe projet
4. **Réaliser** la mission avec les experts et les équipes associées
5. **Évaluer** la mission et ajuster le dispositif si besoin
6. **Assurer** le suivi de la mission : bilans intermédiaires et actions complémentaires